

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ARQUITECTURA



Estructuras de Postes y Cables “Tensegrity”
POSIBILIDADES DE APLICACIÓN

Tesis Profesional que para obtener el Título de
Arquitecto presenta: **Edgar Reyes Nieto**

Asesores:
Dr. Mario de Jesús Carmona y Pardo.
Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas.
Dr. Agustín Hernández Hernández.

Junio del 2005.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



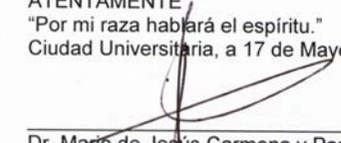
UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

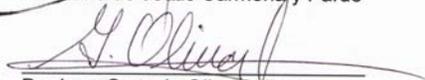
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ARQUITECTURA

Coordinador de Exámenes Profesionales
PRESENTE

Los abajo firmantes del Taller José Villagrán García, aprobamos como apta para presentar Examen Profesional la tesis: **Estructuras de Postes y Cables "Tensegrity", Posibilidades de Aplicación**, del alumno **Edgar Reyes Nieto**, con número de cuenta **9429525-2**.

ATENTAMENTE
"Por mi raza hablará el espíritu."
Ciudad Universitaria, a 17 de Mayo del 2005.


Dr. Mario de Jesús Carmona y Pardo


Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas


Dr. Agustín Hernández Hernández

Vo. Bo.


M. en Arq. Enrique Taracena Franco
Coordinador del Taller José Villagrán García

**“Si el mundo no es una fábrica de sueños,
entonces no se que hago en él”**

AGRADECIMIENTOS

A ti, que siempre creíste en mí, por tu apoyo
y comprensión en todo momento
Gracias Mamá.

A mi Papá y mis hermanos, por ser siempre
un impulso más para seguir adelante.

Con especial cariño para mi tía Inés y su familia,
por darme la fuerza y el coraje para concluir este trabajo.

Mi eterno agradecimiento al señor Braulio Cruz y su familia,
por abrirme las puertas su casa pero sobre todo por
dejarme formar parte de su hogar.

A Víctor H. Cruz por que ya eres mi hermano,
sin ser de mi familia.

A todas y cada una de las personas que la vida ha puesto
en mi camino, por que la vida no sería nada sin su amistad.

ÍNDICE.

INTRODUCCIÓN	8
1.- TEMA	11
1.1 Planteamiento del problema.	
1.2 Objetivo General.	
1.3 Objetivos Particulares.	
1.4 Justificación del tema.	
2.- HISTORIA	14
2.1 Los comienzos de la arquitectura.	
2.2 Introducción al tema.	
2.3 Antecedentes de su desarrollo.	
2.4 Patentes.	
2.5 Análogos.	
3.- GEOMETRÍA DE LAS ESTRUCTURAS DE POSTES Y CABLES	24
3.1 Definición.	
3.2 Clasificación.	
3.3 Metodología.	
3.4 Resumen de Fórmulas.	
3.5 Aplicación de la Metodología.	
4.- PROPUESTA	45
4.1 Introducción	
4.2 Cálculo Geométrico del Módulo.	
4.3 Método de Unión entre Módulos.	
4.4 Renders e Imágenes de Maqueta.	
4.5 Planos de taller.	

5.- CONCLUSIONES	69
5.1 Tesis teórico-práctica.	
5.2 Aportaciones que hace ésta tesis.	
6.- ANEXOS	72
6.1 Introducción.	
6.2 Tensores.	
6.3 Postes.	
6.4 Glosario.	
7.- REFERENCIAS	83
7.1 Bibliografía.	
7.2 Internet.	
7.3 Revistas.	

INTRODUCCIÓN

“El mundo es una armonía de tensiones”

Heraclio de Efeso

INTRODUCCIÓN

A lo largo de su historia, la UNAM, ha marcado el rumbo y ha sido líder en el cultivo y desarrollo de prácticamente todas las disciplinas científicas, humanísticas y sociales, así como en la creación artística y difusión de la cultura. La permanente actualización de sus planes de estudio y de sus profesores e investigadores le ha permitido mantenerse a la vanguardia a lo largo de su historia, y estar preparada para afrontar exitosamente el futuro.

En nuestro país, nuestra institución es pionera en la investigación en campos científicos, en la UNAM se lleva a cabo el 50% de la investigación que se realiza en México. Es responsabilidad de nosotros los universitarios contribuir al trabajo de investigación iniciado por anteriores compañeros, para así mantener a la Universidad en el sitio que siempre ha ocupado.

La Facultad de Arquitectura ha brindando gran apertura para desarrollar tesis de investigación, esto debido a la competencia internacional generada por otras universidades, que tendrá poco a poco mayor auge, como resultado a los tratados de libre comercio firmados con varios países del mundo.

La globalización, es un fenómeno ya no sólo de índole económica, abarca ya diversos campos como los sociales y la arquitectura. Las distancias cada vez son más cortas, y las tecnologías están al alcance de cualquier persona en cualquier parte del mundo.

Como universitarios tenemos el compromiso de estar preparados para enfrentar los retos de una competencia internacional, basada en la ciencia y la tecnología, capaces de actuar de manera solidaria en una sociedad que aún tiene carencias e injusticias; y con una formación humanista que nos permita encontrar sentido y razón a nuestra práctica profesional y pagar a la sociedad por el lugar privilegiado en el que nos encontramos.

El presente documento es resultado del trabajo en conjunto de asesores y mío, como respuesta a una inquietud germinada en mí formación, hace algunos años cuando estíme: realizar una tesis teórico-práctica sobre tensegrity. Tarea no fácil, pero que gracias a la confianza y el apoyo de mis sinodales he podido iniciar, si bien no he podido desarrollar todo acerca de este tema tan extenso y con tantas aplicaciones, al menos ofrezco una alternativa real con antecedentes sólidos.

La primera parte de éste trabajo está dedicada a ubicar las razones por las cuales éste sistema estructural no es utilizado con frecuencia, en la construcción en nuestro país, además plantea los objetivos generales y particulares que espero alcanzar al término de éste trabajo, sin dejar de mencionar las razones que me motivaron a elegir éste sistema estructural como tema de tesis.

El siguiente capítulo es la introducción al tema explicando los antecedentes de su desarrollo, las patentes que han sido registradas sobre éste sistema estructural, además incluye la descripción de algunos ejemplos análogos hechos bajo éste mismo principio.

Después de analizar los antecedentes estamos preparados para intentar dar una definición y explicar la metodología propuesta para geometrizar módulos, que sean fáciles de unir unos con otros para generar armaduras, o una retícula, como base para una cubierta de gran claro.

Para poner en práctica la teoría desarrollada previamente, en el siguiente capítulo se desarrolla un ejemplo, en el cual se aplica la metodología de diseño y resuelve la geometría de una armadura bajo el principio de tensegrity.

Éste trabajo de ninguna manera pretende ser algo definitivo o único en el diseño de las cubiertas ligeras; sino ser únicamente una herramienta de apoyo y estudio donde las futuras generaciones de arquitectos e ingenieros puedan entender las bases teóricas y prácticas de un tema con grandes perspectivas de desarrollo, mostrando las posibilidades de aplicación de éste sistema estructural.

El uso de este principio en nuestro país es casi nulo, sólo a últimas fechas ha habido un intento de utilización de este sistema estructural, en algunas construcciones pero su finalidad ha sido meramente ornamental. Ahora es común ver en algunos edificios, grandes fachadas de cristal, cuya sujeción es a base de postes y cables pero su finalidad es más decorativa y no se explota el verdadero potencial estructural de este principio.

Con la realización de esta tesis de investigación, espero se fomente la participación de profesores y alumnos, en proyectos que impulsen la investigación en el área de tecnología, planteando la aplicación de nuevos sistemas estructurales, analizando entre otros aspectos los tipos de materiales que pueden ser utilizados; a fin de que su aplicación se base en una real fundamentación técnica y no en una simple utopía formal.

1

CAPÍTULO

T E M A

“Para que lo posible se genere, se debe intentar siempre lo imposible”

Hermann Hesse

1 TEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El principal problema del sistema estructural Tensegrity, es la falta de su conocimiento en los diseñadores y constructores nacionales, sobre las posibilidades de éste sistema y sus ventajas, comparado con otros sistemas estructurales convencionales, por ello su poca popularidad. Éste problema se debe a la poca disposición que existe para explorar con nuevos sistemas constructivos, pues en algunos aspectos, la arquitectura nacional ha sido conservadora; razón por la cual México no se encuentra en éste momento en los primeros planos de la arquitectura mundial de alta tecnología, como los países del primer mundo.

El uso de tecnología de punta no justifica el quehacer arquitectónico, pero si lo enriquece. México siempre ha tenido logros de gran nivel cultural, aportando innumerables obras de gran valor histórico, de arquitectos de vanguardia como Pani, Villagrán, y Candela entre muchos otros. Otro punto a demostrar es que los diseños se pueden elaborar con una gran adaptabilidad a diferentes circunstancias y requerimientos de espacio.

1.2 OBJETIVO GENERAL.

El objetivo de ésta tesis es analizar las estructuras de postes y cables, denominadas Tensegrity, haciendo un estudio que abarque sus posibilidades formales y funcionales; adaptándola a las condicionantes propias de nuestro país. Esta investigación tiene como intención ampliar el conocimiento sobre éste tipo de estructuras,

para así tener más opciones formales arquitectónicamente hablando; no como algo de moda, sino como respuesta a necesidades funcionales y estructurales específicas, en respuesta al inicio del siglo XXI.

El horizonte de éste tipo de estructuras es infinito, pues se sigue explorando con nuevas formas y materiales, por lo cual es necesario seguir de cerca la construcción de las cubiertas a base de postes y cables en otros países, no para realizar malas copias, sino para entenderlas y proponer algo innovador acorde al sitio, que tenga valor arquitectónico y funcione de la mejor manera.

También se intenta demostrar que es posible el diseño y la fabricación de éstas estructuras con tecnología y manufactura nacionales, logrando un resultado de alta calidad a un nivel altamente costeable, que resulte atractivo para los constructores nacionales.

1.3 OBJETIVOS PARTICULARES.

- Desarrollar modelos eficientes basados en el principio de tensegrity para su aplicación en cubiertas ligeras.
- Llevar a cabo la aplicación de la metodología propuesta.
- Desarrollar cubiertas ligeras con mejor capacidad estructural, respecto a sistemas estructurales convencionales.
- De acuerdo con las características mecánicas de los materiales, determinar cuáles son los más recomendables para el módulo base, así como la determinación de la geometría de los elementos del mismo.

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA.

En el año 2000 tuve la posibilidad de participar en el Laboratorio de Estructuras, realizando mi servicio social bajo la dirección del doctor Gerardo Oliva, en un tema que siempre me interesó para conocer y entender; el diseño de cubiertas ligeras. Además participé como becario por dos años en el Proyecto PAPIIT IN 402400 “Construcción de Prototipos de Rápido Transporte y Montaje”.

Participar como becario en un proyecto de investigación, me dio la confianza para iniciarme en este trabajo. A raíz de mi estancia en el Laboratorio de Estructuras, y habiendo tomado el curso de Geometría Estructural que imparte el doctor Oliva, comencé a interesarme por éste tema, dándome cuenta de la falta de un documento que se enfocara en la geometría, la historia, la teoría y los conceptos de diseño, que a la vez sirviera de apoyo y guía para entender el desarrollo y diseño de estas estructuras.

La razón por la cual tomé la decisión de desarrollar una tesis teórica con el tema tensegrity, fue el elaborar una guía que conjuntase de manera global todos los datos, mencionando los requerimientos cognoscitivos y prácticos que se requieren para introducirse en un tema, que en algunos casos puede ser una excelente opción de diseño.

El desarrollo del tema surge como resultado del análisis de información que en la mayoría de los casos es de difícil acceso para aquellos que se pueden interesar. Por ejemplo, la información que existe es escasa y está dispersa, siendo en su mayoría de un alto contenido técnico, además de que se encuentra en otros idiomas, todo esto hace que se dificulte aún más su comprensión.

La investigación aquí desarrollada, está basada en información de diversas fuentes, reuniéndola y complementándola en cada uno de los puntos a tratar; intentando siempre aportar opiniones personales basadas en la experiencia adquirida en la Universidad.

2

CAPÍTULO

H I S T O R I A

**“Si deseas controlar el futuro,
estudia el pasado”**

CONFUCIO

2 HISTORIA.

2.1 LOS COMIENZOS DE LA ARQUITECTURA.¹

La arquitectura es un arte que tuvo sus inicios hace 10,000 años, cuando el hombre y la mujer, habiendo descubierto la agricultura, fueron capaces de recorrer la superficie de la tierra en busca de comida. Hasta entonces ellos estuvieron expuestos al clima, precariamente protegidos por tiendas de pieles de animales. Siempre en sus migraciones cocinaban sobre fogatas y recolectaban en pequeñas tribus.



Figura 1.1 Dominio del fuego.

¹ Mario Salvadori, "Why Buildings Stand Up", W.W. Norton & Company, New York, 2002.

Todo ésto cambió cuando se volvieron sedentarios, las tiendas fueron suplantadas por moradas más elaboradas, y un fuego permanente, que llegó a ser el centro del hogar. Numerosas chozas surgieron en áreas fértiles; el contacto entre familias llegó a ser más frecuente e íntimo; surgieron villas y de villa a villa surgieron caminos, después estos caminos tuvieron que cruzar ríos y barrancas, requiriendo la construcción de puentes, hechos de troncos de árboles o suspendidos por cuerdas de fibras vegetales.

Los grupos de chozas generaron la necesidad de espacios más grandes, donde los problemas de la villa podían ser discutidos. Éstas grandes estructuras servían también como ayuntamientos o iglesias, desde entonces las necesidades espirituales han ido siempre de la mano con lo físico. Desde luego los grandes monumentos de la arquitectura arqueológica fueron a menudo motivados por necesidades espirituales.

Los cambios en la arquitectura, fueron provocados por la conglomeración de personas en determinados espacios. La arquitectura es amiga de la ciudad, si nosotros nos reunimos primero en villas, después en pueblos y ciudades, lo cual fue la mejor manera para defendernos de nuestros enemigos, o si el intercambio en el comercio y oficios requirieron la proximidad de los primeros cientos y eventualmente millones de habitantes; ésta fue la ciudad que nos guió a erigir edificios cada vez más altos y confinar espacios cada vez más grandes.

Pero la arquitectura tuvo que esperar miles de años, para lograr un desarrollo significativo, fue hasta la segunda mitad del siglo XX, cuando se pudieron realizar edificios como los que podemos construir hoy en día. Antes de que se diera un gran desarrollo en la tecnología de la construcción y el uso del acero, otras técnicas

constructivas como el uso de madera y piedra, se fueron desarrollando lentamente a través del tiempo. Por siglos, el sistema constructivo para edificar fue la mampostería, y el principio estructural más utilizado fue la compresión.

De las pirámides egipcias a las catedrales góticas, pasando por las construcciones griegas, la estabilidad de la mayoría de las construcciones se basaba en el peso del edificio. Los constructores de estos edificios pensaban y concebían de acuerdo a la compresión; en muros y columnas que soportaran grandes cargas, y en pequeños claros para evitar que las estructuras se colapsaran debido a su gran peso.

Pero los sistemas a compresión también tuvieron un gran desarrollo, como por ejemplo la cúpula del Panteón de Agripa, en la cual se salva un claro de 43 metros con piedra.



Figura 1.2 Vista interior del Panteón de Agripa.

Estos sistemas a base de mampostería, llegaron a su perfeccionamiento en las catedrales góticas, lo cual sucedió conforme se mejoraban las bóvedas con nervaduras y el uso de contrafuertes, con lo que se lograron mayores claros, pues la tendencia siempre ha sido hacia la ligereza estructural.

En la Revolución Industrial a mediados del siglo XVIII, se logró el perfeccionamiento en el uso del hierro y esto cambió la mentalidad y la forma de concepción estructural de arquitectos e ingenieros. En el siglo XX se construye principalmente con acero y concreto armado, y el principio estructural es la rigidez a la flexión; materiales como el concreto armado adquirieron una amplia aceptación, debido a que combinaban tanto la tradición pétreo en estructuras a compresión, como las propiedades elásticas del acero.

El Palacio de Cristal en Inglaterra de 1850 y el Centro Pompidou en París en 1980 de Richard Rogers y Renzo Piano, tienen en común que los diseñadores de estos edificios pensaban en armaduras, resistencia a la flexión, compresión, columnas delgadas y recubrimientos de cristal no estructural.



Figura 1.3 Palacio de Cristal.

Últimamente en la construcción de cubiertas ligeras de gran claro, se han usado los sistemas estructurales a base de postes y cables, éstos son extremadamente ligeros, pues emplean un principio estructural que optimiza la forma y combina la resistencia a la tracción de los cables, con la resistencia a la compresión de los postes.

Si bien los nuevos materiales han sido vistos con escepticismo por los más conservadores, poco a poco se ha abierto el camino hacia una gran ligereza visual y constructiva; y ha sido hasta éste siglo, cuando debido al desarrollo de la tecnología y el cálculo estructural, se ha comenzado a generalizar su uso, y se ha iniciado la búsqueda de su verdadero potencial estructural.

Ahora el principio estructural es la optimización de la compresión y la tracción en un sólo sistema estructural, aquí el material y el peso han sido reducidos al mínimo y todo lo que se ve es una unidad estructural, dando como resultado formas más libres y naturales, en las cuales la arquitectura y la ingeniería se complementan, llegando a ser una sola ciencia.

2.2 INTRODUCCIÓN AL TEMA.

Cuando se construye una cubierta ligera, también se utilizan toneladas de concreto, o algún otro material que sirven de lastre de la estructura. ¿Cómo puede esta cubierta ser llamada ligera?

Esta pregunta tiene una respuesta muy simple, las estructuras a tracción deben ser sujetadas de algún lado; de otro modo la tracción desaparece y la estructura es arrastrada por el viento. Este tipo de estructuras usualmente son sujetadas al suelo, y la tierra es el lastre que mantiene la estructura tensa. Pero hacer la conexión

entre la tierra y la membrana no es fácil, por lo que muchas veces es necesario anclar la estructura en concreto armado.

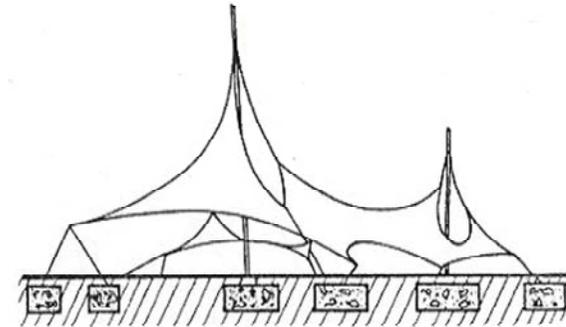


Figura 1.4 Las estructuras ligeras, necesitan lastrarse al suelo.

El sistema estructural tensegrity se compone de anclajes en sí, sin embargo; ellos tiran sólo en dirección contraria a ellos. Éstas estructuras son traccionadas entre ellas mismas en un sistema cerrado. Tracción y Compresión casi siempre están presentes en una estructura. En el caso de una viga libremente apoyada y sometida a una fuerza uniformemente repartida aplicada en la parte superior, tendrá una deformación de tal forma que su cara inferior es traccionada, mientras que la superior es comprimida.

El desafío de las estructuras eficientes está en el correcto uso de los materiales y la geometría, logrando una correspondencia entre forma y comportamiento estructural. Es conveniente que los componentes a tracción estén hechos de materiales que trabajen a tracción (cables), mientras que los componentes a compresión estén hechos de materiales que resistan la compresión (postes). En el sistema estructural tensegrity está la más pura expresión

de este principio; en una estructura de tensegrity pura, los miembros a compresión no hacen contacto unos con otros, estos puntales están suspendidos en una red constituida únicamente por elementos que trabajan a tracción.

La mejor introducción a los sistemas de tensegrity, es el poder construir un pequeño modelo. Para realizar la unidad que denominaremos “equilibrio elemental”, necesitaremos tres barras o elementos a compresión de igual longitud, y nueve cables o elementos a tracción también de igual longitud.

La igualdad de distancias en cada uno de los dos tipos de elementos, justifica la denominación de “regular” que será adoptada por éste sistema elemental. Es necesario para éste caso en específico, que la proporción “r” (del inglés ratio) entre la longitud del elemento a compresión “s” (del inglés “stuts”) y la longitud de los elementos a tracción “c” (cables) debe ser igual a 1.468. Cualquier variación en la longitud de cada elemento creará un sistema sin rigidez; cuando en un sistema no se pueda obtener la forma, significa que “r” es menor a 1.468, y en un sistema será muy difícil y quizás imposible el ensamble si “r” es mayor a 1.468.

$r = \frac{s}{c} = 1.468$	<p>Donde:</p> <p>s = longitud del poste</p> <p>c = longitud del cable</p> <p>r = proporción adecuada para lograr una geometría estable</p>
---------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Despejamos “c” de la ecuación

$$c = \frac{15}{1.468}$$

$$c = \frac{s}{1.468}$$

$$c = 10.21 \text{ unidades}$$

Para este ejemplo daremos 15 unidades de longitud para los postes.

El cable debe tener una longitud de: 10.21 unidades

Este es el primer paso en el camino para el aprendizaje de los sistemas de tensegrity. Espero que el realizar nuestro primer modelo, sea la clave para entender los siguientes apartados. Si bien ésta simple fórmula es una manera de geometrizar un modelo, más adelante nos daremos cuenta que tiene muchas limitantes que no nos convienen para la aplicación que queremos dar a estos, pero sí nos sirve para ilustrar, con el modelo más simple, como se logra el equilibrio en éste sistema estructural.

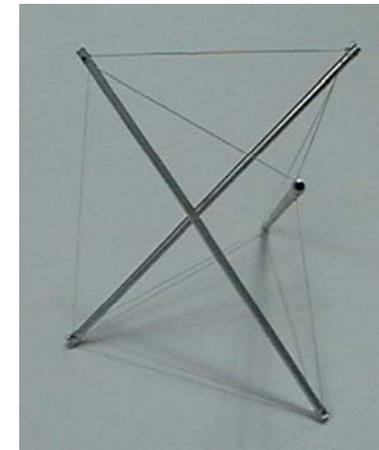


Figura 1.5 Imagen del modelo realizado.

2.3 ANTECEDENTES DE SU DESARROLLO.²

Los primeros ejemplos que se aproximan a lo que podría ser llamado estructura de “tensegrity” fueron hechas por el artista Ruso, **Karl Ioganson**, y presentadas en la Exhibición Obmokhu (la sociedad de jóvenes artistas) en mayo de 1921. Ioganson fue miembro fundador del Primer Grupo de trabajo de Constructivistas y formó parte del primer debate para reemplazar la composición artística, intuitiva y orientada al gusto, por la construcción progresiva, orientada a la tecnología y a la ingeniería.

Una reciente exhibición en el museo Guggenheim, “La vanguardia Rusa Soviética, 1916-1932” mostró más detalles de su trabajo; Rodchenko, uno de los constructivistas escribió en enero de 1921, “todo nuevo acercamiento al arte, surge de la tecnología, la ingeniería y se dirige hacia la construcción”. Un año después Karl Ioganson escribió: “

“De la pintura a la escultura, de la escultura a la construcción, de la construcción a la tecnología y la invención, ésta es mi ruta escogida, y seguramente será la última meta de cada artista revolucionario”.

En la exhibición arriba mencionada, Ioganson mostró su “escultura estructura” terminada durante 1920 y en sus “Estudios en Equilibrio” de ese mismo año, ahora perdidos, y que sabemos de ellos solo por fotos y descripciones; Ioganson equilibró tres barras, estos elementos a compresión no se tocaban entre sí, los equilibraba con un cable continuo a tracción corriendo a través de los postes huecos de extremo a extremo.

² Rene Motro, “Tensegrity : structural systems for the future”, Ed. Kogan page science, Estados Unidos, 2003.

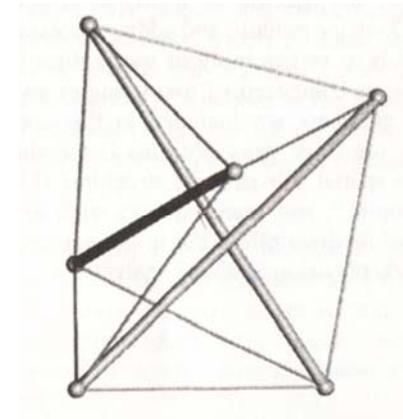


Figura 1.6 Escultura de Karl Ioganson exhibida en 1921.

Como Laszlo Moholy Nagy explicó después, en su libro “Del material hacia la Arquitectura” publicado en 1929 y reimpresso en 1968; tirando del cable puede cambiar la posición de los postes, y la estructura permanece en equilibrio, además incluye dos fotografías tomadas de la exhibición de 1921 en Moscú. Christina Lodder, una escolar de esa época, especuló que Ioganson deseó integrar su arte con el material, lo cual era objetivo de la revolución. Sus esculturas tuvieron un “imperativo utilitario” y fueron pensadas para ser modelos de “estructuras útiles y portátiles, kioscos desmontables o plegables; artículos de mobiliario”

Desafortunadamente, la promesa de esta idea no fue reconocida en Rusia, y las estructuras de tensegrity, puede decirse que fueron inventadas por el escultor Kenneth Snelson en 1948, como resultado de un semestre de estudio con Richard Buckminster Fuller. Este último, inmediatamente vio el potencial de la idea de Snelson, hizo mejoras sobre esto, e inicio una campaña de divulgación, finalmente patentó su versión en 1962. Aunque la idea que fascinó a arquitectos e ingenieros de esa época sobre la estructura de tensegrity, fue en la primera exhibición en el Museo de Arte Moderno en 1959, y aunque Snelson se hizo de gran reputación por sus construcciones de esculturas a gran escala de tensegrity, la presunción duró hasta que recientemente éstas estructuras no fueron prácticas como estructuras permanentes por su gran tamaño.

2.4 PATENTES.

Varios documentos muestran que Richard Buckminster Fuller registró sus patentes en Estados Unidos casi simultáneamente con David Georges Emmerich en Francia, en los principios de los años 60's.

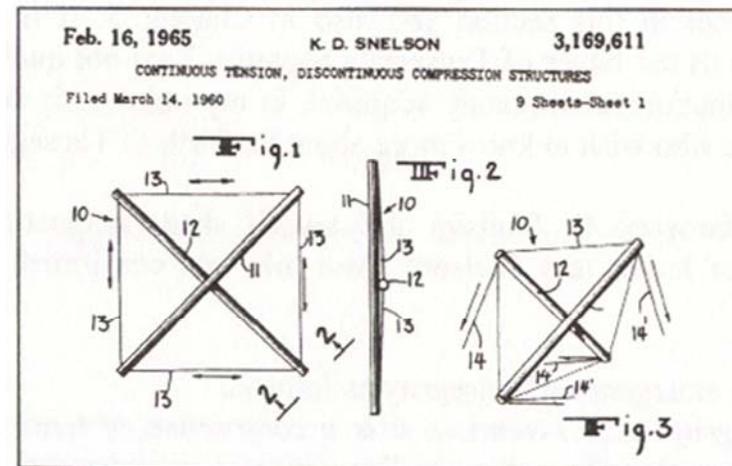


Figura 1.7 Patente de Snelson.

David Georges Emmerich patentó el primer sistema llamado "Pearl Frameworks" en el INPI (Instituto Nacional de la Protección Industrial), pero esta no fue correctamente registrada, su segunda patente es fechada en 1963 y otorgada en 1964 y fue titulada "Construction de Reseaux Autotendants". La principal patente de Fuller fue registrada en 1959 y otorgada en 1962, Fuller escogió el nombre "Tensile Integrity". La patente de Snelson "Continuous tension, discontinuos compression structures" fue registrada en 1960, y otorgada en 1965.

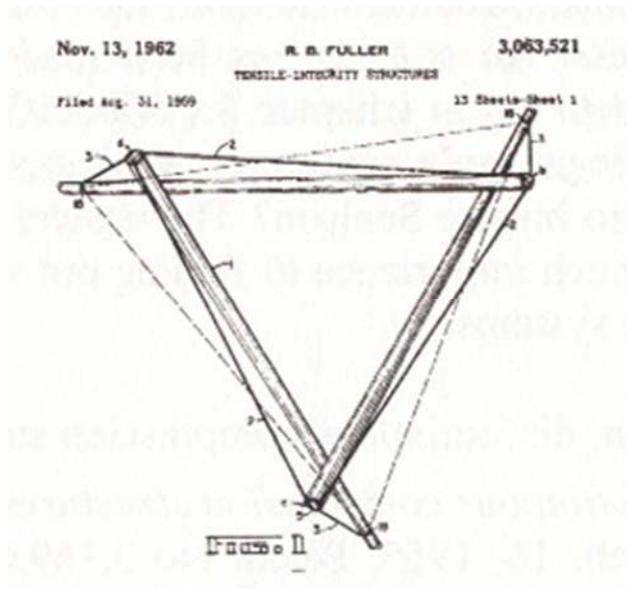


Figura 1.8 Patente de Fuller.

Lo que paso de ahí en adelante entre Snelson y Fuller, es fuente de controversia. Además David Georges Emmerich en Francia, clamó que el fue el inventor de este nuevo sistema estructural, refiriéndose a ellos como “Autotendants”.

En la publicación del Internacional Journal of Space Structures de 1996, dos puntos pueden ser señalados:
PRIMERO: El sistema estructural descrito por los tres, es el mismo.
SEGUNDO: Fué Fuller quien creó la palabra tensegrity.

El análisis de estas tres patentes sería un proceso tardado y complejo, por estas dos razones es mejor no atribuir mucha importancia en enterarse quien fue el primero en patentar el sistema de tensegrity, y dedicarnos al estudio de este sistema en otras áreas de mayor interés para nosotros.

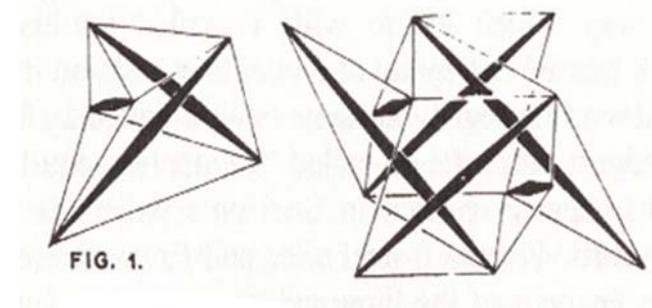


Figura 1.9 Patente de Emmerich.

2.5 ANÁLOGOS.

DOMOS GEIGER.

Los domos tensegrity preesforzados propuestos por el Ingeniero David Geiger³ están compuestos, en esencia, por 4 armaduras poste-cable radiales conformadas cada una por: dos postes, dos cables diagonales, un cable arista, anillos interiores y un cable aro. En conjunto no hay cables continuos, y el domo tiene en total 24 segmentos de cable y 8 postes (Ver figura 2). Estos elementos estructurales están presentes en los cuatro domos de grandes dimensiones que propuso y fueron construidos.

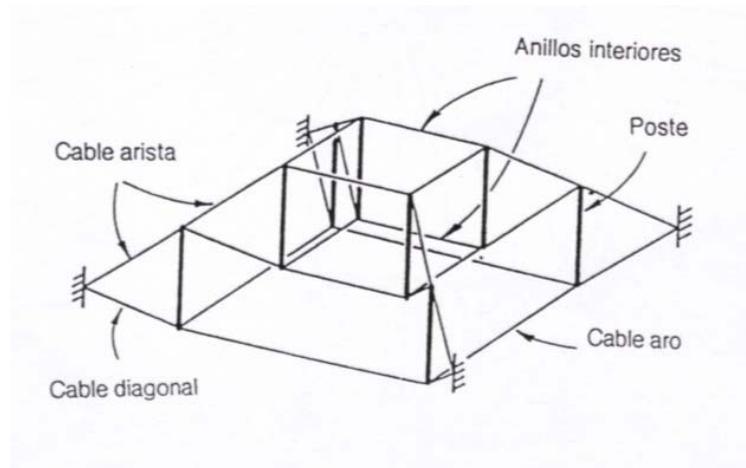


Figura 2 Domo cable Geiger.

³ David Geiger: Ingeniero nacido en Filadelfia, Estados Unidos en 1935, y fallecido en Seúl, Corea, en 1989. Entre sus obras más importantes están el Domo Sun Coast en 1989, y el Pabellón de Estados Unidos en la Exposición Universal de Osaka en 1970.

Está claro que estos domos han sido inspirados por el principio de tensegrity, la red completa de cables y postes esta asociada con un gran anillo de compresión, justo como las membranas están traccionadas en una mezcla de mástiles. Dos tipos de componentes a compresión pueden ser identificados: postes verticales y anillo de compresión, el anterior componente es la frontera del sistema (Ver figura 2.1).

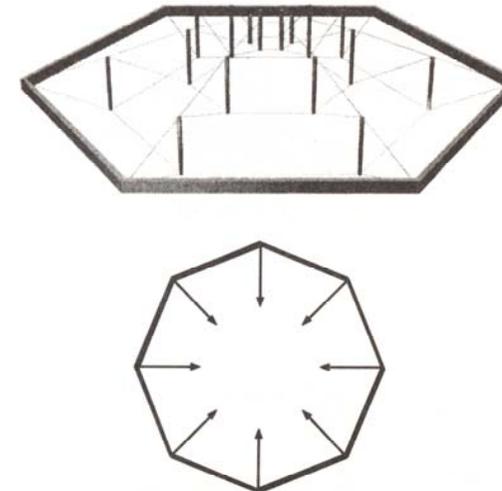


Figura 2.1 Principio del Domo Cable.

Generalmente el anillo de compresión es hecho de concreto reforzado, algunas veces en concreto pretensado y su tamaño no es comparable con los otros componentes. Además, estos anillos pueden ser parte del edificio y es difícil identificar a este como una entidad separada.

DOMO SUN COAST.

Construido en San Petersburgo, Florida; tiene una planta circular con un diámetro de 210 metros, fue terminado en septiembre de 1989.

La estructura principal consiste en 24 armaduras poste-cable radiales, las cuales son pretensadas por cuatro aros cable y un anillo perimetral de compresión. Cada armadura radial consiste en un cable-arista, el cual conecta el anillo de tensión superior al anillo de compresión; 5 postes verticales y 5 cables diagonales unen el cable arista al aro cable, además de conectar el anillo de tracción superior al inferior. El aro cable es conectado solamente a la parte inferior de los postes. (Ver figura 2.2)



Figura 2.2 Domo Sun Coast en construcción.

El aro cable es ensamblado a un ramal denominado “lang”, prolongándose a través de articulaciones de acero, las cuales son articuladas a cada poste vertical. El número de ramales varía entre 140, en el aro más lejano, y 40 en el más cercano. Los cables diagonal y de arista son, además, ensamblados por ramales “lang” y cada ramal es fijado a la parte inferior del poste original y se dirige a la parte superior del poste continuo siguiente (en el mismo plano radial) y se articula al cable arista sobre cualquier otro poste en este plano. El ramal es entonces sujetado al anillo de compresión. En suma, segmentos de cuerda de sección transversal seis veces mayor que el ramal “lang” corren paralelas al mismo.



Figura 2.3 Vista del domo terminado.

3

CAPÍTULO

G E O M E T R Í A

**“He aprendido que todo es posible,
si se está inspirado”**

STEVE NASH

3 GEOMETRÍA.

3.1 DEFINICIÓN.¹

Si el origen de los sistemas de tensegrity es controversia, es también difícil dar una definición. Buscando en la literatura pueden ser encontrados algunos ejemplos, primero citaré a Richard Buckminster Fuller, que describe el principio de tensegrity como: **“Islas de compresión dentro de un océano de tracción”**.

Basándonos en este principio, muchos objetos pueden ser relacionados con los sistemas de tensegrity; un globo y más general cualquier superficie inflada adecuada para esto, sin precisar material o forma es incluida en este concepto; en un globo el aire es comprimido y abarcado dentro de una envolvente traccionada.

La siguiente definición ha sido establecida por Rene Motro en base a las patentes, las cuales describen la misma estructura y han sido registradas por Fuller, Snelson y Emmerich.

Los sistemas de tensegrity son sistemas de retícula espacial en un estado de auto-esfuerzo. Los elementos traccionados no tienen rigidez a la compresión y constituyen un armazón continuo. Los elementos a compresión constituyen un armazón discontinuo. Cada nodo recibe uno y solo un elemento a compresión.

¹ Rene Motro, “Tensegrity : structural systems for the future”, Ed. Kogan page science, Estados Unidos, 2003.

La idea básica de este principio estructural esta incluida en el concepto descrito por la expresión: “Islas de compresión en un océano de tracción”.

En primer plano es obvio ubicar aquí dos tipos de componentes (elementos a tracción y a compresión), una segunda parte incluida en este concepto es la siguiente: La compresión está dentro de la tracción. Una tercera idea dice que los elementos a compresión son islas, conformando un armazón discontinuo. Además los elementos a tracción están reunidos en un armazón continuo, conformando así un completo sistema en equilibrio.

Después del anterior análisis de este principio estructural, me permitiré mencionar la definición dada por Anthony Pugh:

“Un sistema de tensegrity es establecido cuando un armazón discontinuo de elementos a compresión interactúa con un armazón continuo de elementos a tracción, para definir un volumen estable en el espacio”

Como mencioné al inicio de este apartado, es difícil dar una definición exacta de este sistema estructural, pero gracias a la experiencia adquirida, me atrevo a decir que la anterior definición es la más acertada.

3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS TENSEGRITY.

Las estructuras tensegrity se caracterizan por el manejo de una geometría sinérgica², más sin embargo estas geometrías parten de una geometría base, la cual puede ser principalmente de dos tipos:

- Prisma Circular.
- Esfera.

Como se puede ver, las dos geometrías base son espaciales; característica que nos ayuda a comprender de una mejor manera el por qué no se puede simplificar el análisis a un plano, como se hace en el análisis de las armaduras convencionales.

Modelos Generados a partir de Prisma Circular.

Se encuentran dentro de estos, aquellos que se generan a partir de dicho prisma. El cilindro se caracteriza por tener dos caras planas como bases y una cara curva lateral, mientras que un prisma cuenta con dos caras basales y a diferencia del cilindro, sus caras laterales pueden ser cuadrados o rectángulos.

Por lo cual, en un sentido estricto, quizá el cilindro no deba llamarse prisma circular, sin embargo basado en el hecho de que son prismas los que a final de cuentas se generan a partir de éste y con un método gráfico podemos delinear

su cara lateral para que nos de una curva, mediante elementos diferenciales que sean cuadrados o rectángulos, entonces desde este punto de vista, los modelos generados a partir del cilindro, serán llamadas también de prisma circular recto.

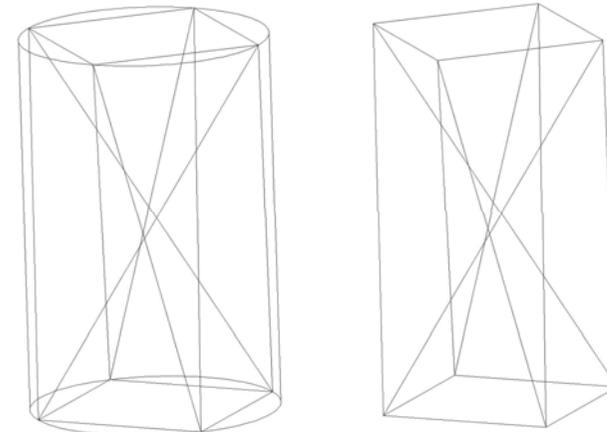


Figura 2.4 Armadura Tensegrity generada a partir de un prisma circular.

Estos modelos se caracterizan por resistir cargas sobre las caras planas de la estructura y presentan la facilidad de poder conectarse con otros modelos del mismo tipo, llegando a formar largas cadenas modulares.

² Geometría Sinérgica puede definirse como una rama de las matemáticas, que se encarga de estudiar las propiedades de los cuerpos en el espacio, cuya acción conjunta o combinada es diferente, igual o mayor que la suma de los efectos que producirían estos por separado.

Modelos Generados a partir de una Esfera.

Las armaduras de este tipo son las que tienen como génesis la esfera. Se caracterizan por resistir cargas en todas direcciones y a diferencia de las de prisma circular, por su geometría éstas presentan dificultad para conectarse con otros módulos, con el fin de formar cadenas, pero presentan la bondad de ser aplicadas en domos geodésicos.

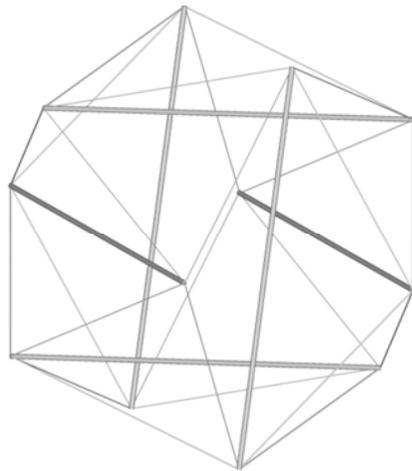


Figura 2.5 Armadura Tensegrity generada a partir de una esfera.

Otra propuesta para el diseño de estas estructuras se da partiendo de la Geometría de los poliedros regulares; los más usados han sido los derivados de los sólidos de Platón.

Los cuerpos regulares son nueve, de los cuales cinco son convexos y los otros cuatro son no convexos. Los convexos también conocidos como sólidos platónicos son: el tetraedro, hexaedro, octaedro, dodecaedro e icosaedro.

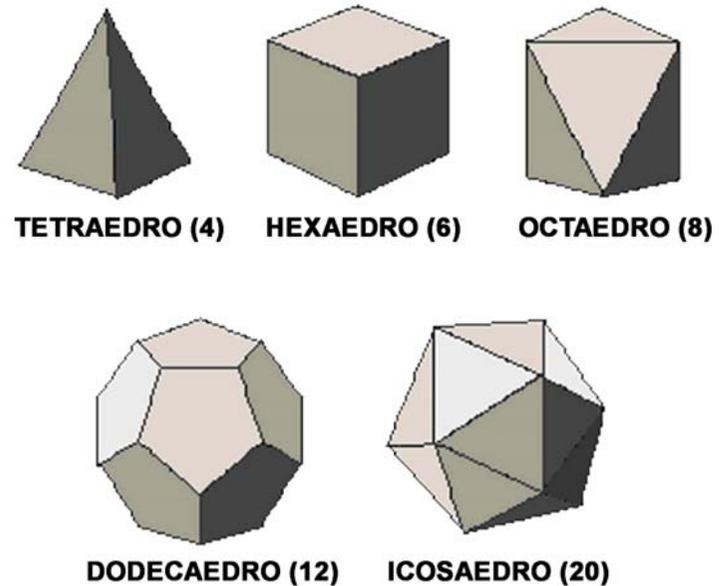
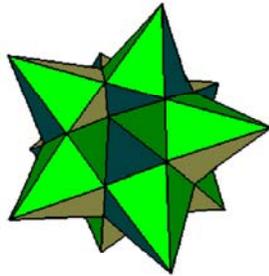


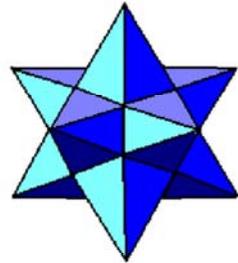
Figura 2.6 Cuerpos regulares convexos.

Por otro lado, de los no convexos, dos son los sólidos regulares de Kepler, y son: el pequeño dodecaedro estrellado y el gran dodecaedro estrellado. Los dos faltantes son los descubiertos por Louis Poincot y son el pequeño icosaedro y el gran icosaedro.³

³ Holden, A., "Shapes, and Symmetry", Dover Publications Inc., New York, 1991.

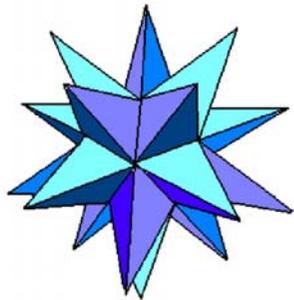


GRAN DODECAEDRO ESTRELLADO

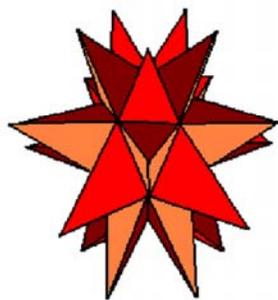


PEQUEÑO DODECAEDRO ESTRELLADO

Figura 2.7 Sólidos regulares de Kepler.



GRAN ICOSAEDRO ESTRELLADO



PEQUEÑO ICOSAEDRO ESTRELLADO

Figura 2.8 Sólidos regulares de Louis Poinset.

Las primeras investigaciones sobre la aplicación de poliedros como módulos base en estos sistemas se debieron a R. Buckminster Fuller, quien ahondó en sus estudios específicamente sobre la aplicación del cuboctaedro. Este es un sólido semiregular que nace a partir de la dualidad del hexaedro o cubo y el octaedro.

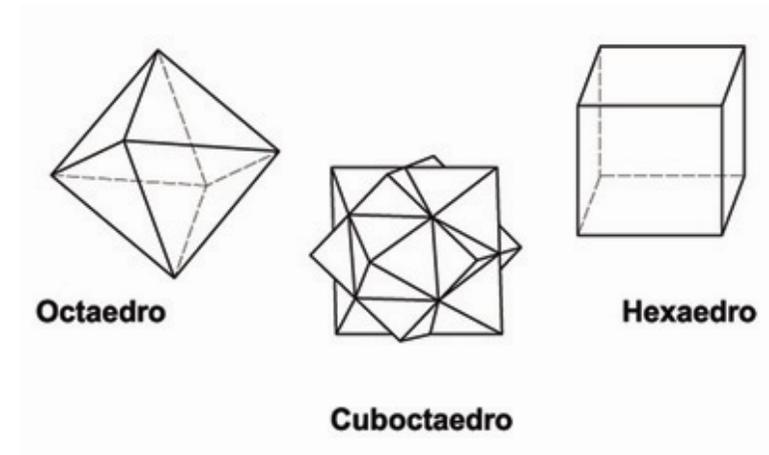


Figura 2.9 Dualidad entre dos sólidos de Platón.

3.3 METODOLOGÍA.⁴

Después de analizar la clasificación y tomando en cuenta las características de cada una de las diferentes figuras geométricas, de las cuales puede partir una estructura de tensegrity considero que las estructuras de tensegrity que parten del prisma circular recto son las más aptas para usarlas como módulo para una armadura de gran claro por las siguientes razones:

- Por su geometría el prisma circular recto provee de dos superficies planas (en las cuales se inscriben los polígonos, que determinan el número de postes del modelo); cualquiera de estas dos superficies podrá ser utilizada como punto de apoyo para el material con el cual aislaremos de la intemperie el inmueble a cubrir.
- La geometría que generan los postes con los cables en sus caras laterales son triángulos, siendo esta última, la figura geométrica indeformable, es una ventaja estructural aprovechar la morfología misma de la estructura.
- Por ser módulos limitados por polígonos regulares, es fácil la unión de unos con otros para generar armaduras, si se copian en un sentido, y una estructura modular si se combinan en todas direcciones.

El modelo realizado, al inicio de este trabajo, es una estructura de tensegrity que parte de un prisma circular recto, la más simple que podemos realizar, sin embargo como ya había mencionado, esta fórmula si bien resuelve la geometría, y nos da herramientas para poder realizar un modelo a escala, tiene muchas carencias, dado que la fórmula esta en función de la longitud de los postes y cables, sin tomar en cuenta las dimensiones del prisma circular que es la figura inicial de la cual parte la estructura; esto sin mencionar que sólo es valida para una estructura con tres postes y limita el campo de diseño, únicamente a este modelo.

Este modelo simula un prisma triangular en el cual uno de sus extremos ha sido rotado con respecto al otro. Un puntal adicional convertirá las caras triangulares en cuadradas; otro puntal las convertirá en pentágonos, y así sucesivamente (Ver Figura 3). De esta manera es posible generar una gran familia de prismas tensegrity.

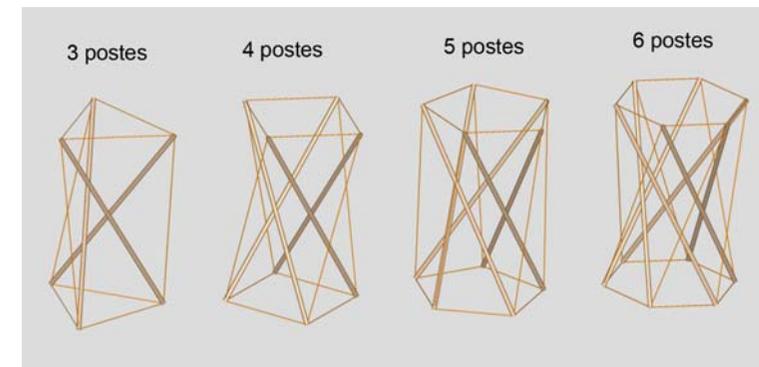


Figura 3 Modelos Tensegrity generados a partir del cilindro.

⁴ Kenner, H., "Geodesic Math and How to Use it", Edit. The Regents of the University of California, 1/a. Edición, Estados Unidos, 2003.

Podemos imaginar a los prismas tensegrity ilustrados en la figura anterior, encerrados o contenidos en un cilindro de altura "h" y de diámetro "d", dicho prisma se compone de cables (de longitud e) los cuales se encuentran delineando los lados de los polígonos inscritos en la tapa superior e inferior del prisma circular y son llamados cables terminales.

También hay cables laterales que unen los polígonos inscritos en la tapa superior e inferior del cilindro, los cuales tienen una longitud "c". El número de lados del polígono inscrito estará dado por "n", que también indica el número de postes, el número de cables laterales y por supuesto el número de cables limitando las orillas del polígono (Ver Figura 3.1).

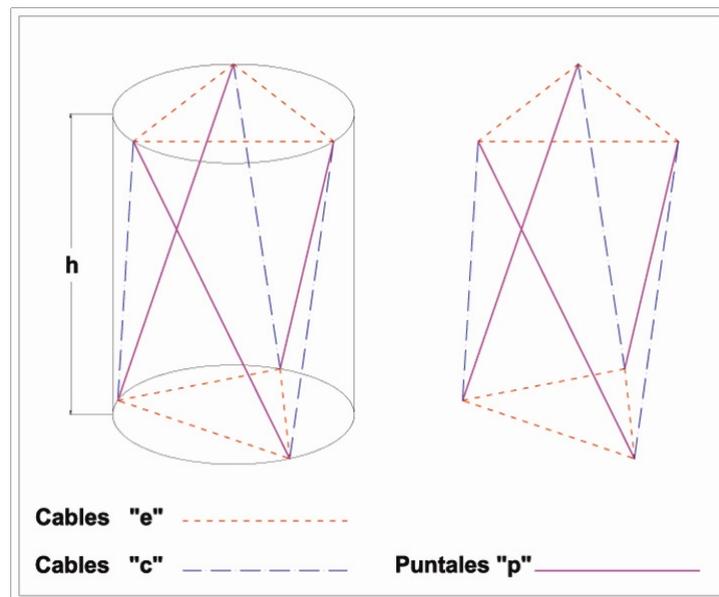


Figura 3.1 Módulo Tensegrity contenido dentro de un cilindro

Partiendo de que el triángulo es la figura más estable, comenzaremos por inscribir este en la tapa superior e inferior del prisma circular, aunque las ecuaciones generadas serán también aplicables a polígonos de más lados.

Se asume que los polígonos inscritos son equiláteros, si ellos son iguales entre sí, el prisma es uniforme. Si no son de igual tamaño, (aunque equiláteros) el prisma es semiuniforme y deberá ser encerrado mediante un cono truncado en vez de un cilindro.

Al igual que los cables laterales (c), los puntales (p) también unen los vértices correspondientes a los polígonos de la parte superior e inferior. Todos los puntales de un prisma tensegrity se inclinarán uniformemente ya sea en dirección de las manecillas del reloj o en sentido contrario.

Eso es debido a la torsión referida anteriormente; el polígono superior ha sido rotado con respecto al polígono inferior a través de un ángulo "α" llamado el ángulo de torsión. (Ver Figura 3.2)

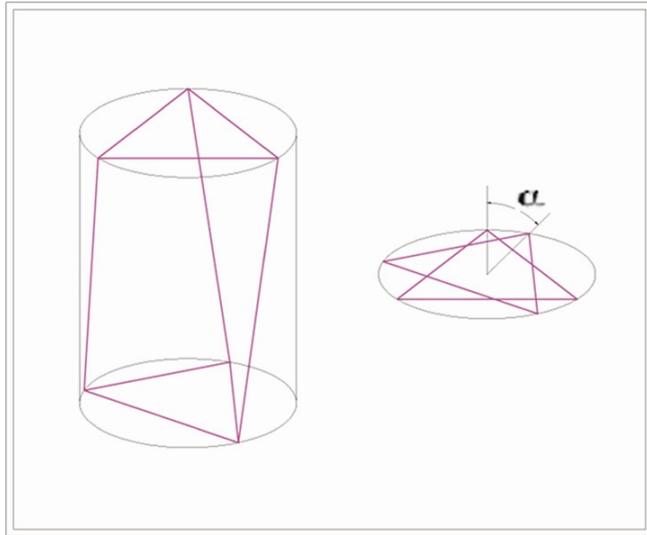


Figura 3.2 Ángulo de torsión entre los dos polígonos inscritos

El ángulo de torsión es constante en una estructura con un número determinado de puntales (en función del polígono inscrito), independientemente de cual sea la altura o diámetro de la estructura, este ángulo es importante, ya que con la ayuda de él se determinarán las ecuaciones para las longitudes de los elementos de la estructura, para cualquier tipo de valores de “n” y “h”.

Es fácil darse cuenta que todos los polígonos que se forman en la superficie lateral del prisma circular son triángulos, lo cual facilitará los cálculos.

El ángulo de torsión se obtendrá a partir de la figura 3.3 como se indica a continuación: Usando coordenadas

cilíndricas⁵, el cable “e” que delinea los lados de los polígonos subtende un ángulo central de $360^\circ/n$, por lo tanto las coordenadas cilíndricas (r_1, ϕ, z) de “A” y “B” son entonces $(r_1, 0, 0)$ y $(r_1, 360^\circ/n, 0)$ respectivamente.

El punto “C” no está localizado exactamente arriba del punto “B”, pero es mostrado de manera inversa a las manecillas del reloj mediante un ángulo adicional “α” (ángulo de torsión); las coordenadas del punto “C” son entonces

$$(r_2, \frac{360^\circ}{n} + \alpha, h).$$

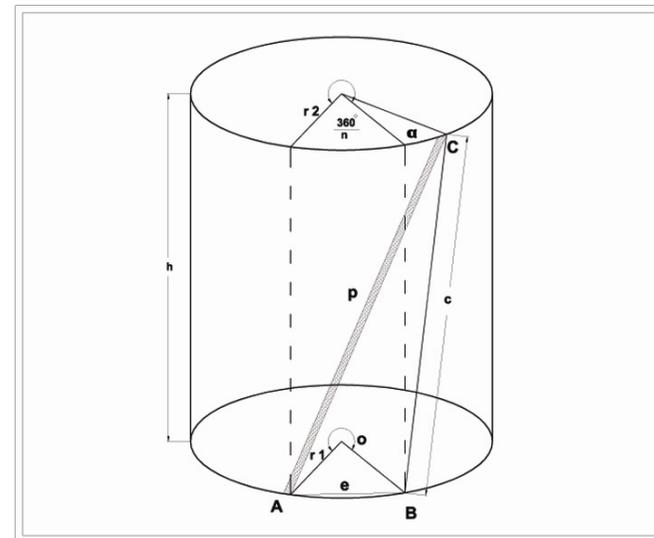


Figura 3.3 Determinación del ángulo de torsión.

⁵ Coordenadas cilíndricas: Sistema de coordenadas para ubicar la posición de un punto en el espacio, para lo cual se requieren tres valores (radio, ángulo, alto).

Las distancias AC y BC son puntales de longitud “p” y cables de longitud “c”, respectivamente. Para obtener estas distancias, lo haremos proyectando el punto “C” a la tapa inferior del prisma circular, llegando al punto “D”. (Ver Figura 3.4)

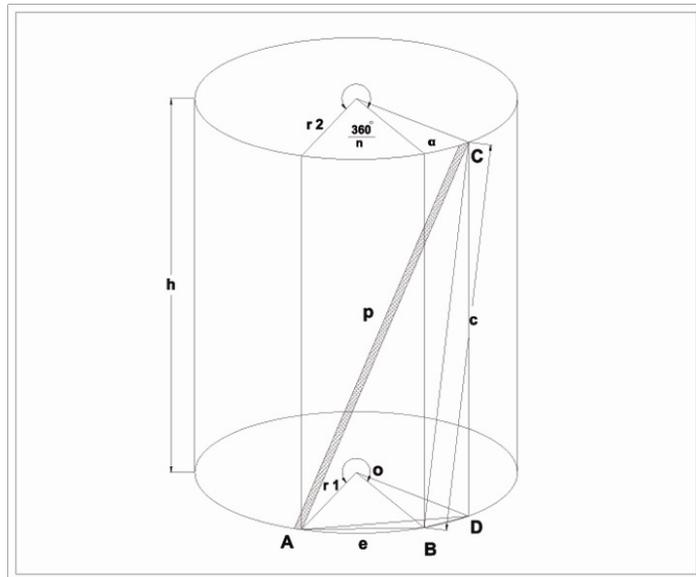


Figura 3.4 Proyección de puntos en el cilindro.

En la figura 3.4 se tiene el triángulo rectángulo ADC y por el teorema de Pitágoras:

$$\overline{AC} = \sqrt{\overline{AD}^2 + \overline{CD}^2}$$

Del triángulo AOD por la Ley de los Cosenos se tiene que:

$$\overline{AD}^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2 r_1 r_2 \cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right)$$

Se sabe que $\overline{CD} = h$. Por lo tanto:

$$\overline{AC}^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2 r_1 r_2 \cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) + h^2$$

$$\overline{AC} = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2 r_1 r_2 \cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) + h^2}$$

$$p = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2 r_1 r_2 \cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) + h^2} \tag{4.1}$$

Para obtener la distancia $\overline{BC} = c$, usando el triángulo rectángulo BDC por el teorema de Pitágoras se tiene que:

$$\overline{BC} = \sqrt{\overline{BD}^2 + \overline{CD}^2}$$

Del triángulo BOD por la Ley de los Cosenos se tiene que:

$$\overline{BD}^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \alpha$$

Se sabe que $\overline{CD} = h$. Por lo tanto:

$$\overline{BC}^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \alpha + h^2$$

$$\overline{BC} = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \alpha + h^2}$$

$$c = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \alpha + h^2} \quad (4.2)$$

Despejando "h" de la ecuación (4.1), se obtiene:

$$h^2 = p^2 - r_1^2 - r_2^2 + 2r_1r_2 \cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right)$$

Sustituyendo en la ecuación (4.2) resulta:

$$c = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \alpha + p^2 - r_1^2 - r_2^2 + 2r_1r_2 \cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right)}$$

$$c = \sqrt{2r_1r_2 \cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) - 2r_1r_2 \cos \alpha + p^2}$$

$$c = \sqrt{p^2 + 2r_1r_2 \left[\cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) - \cos \alpha \right]}$$

Diferenciando la ecuación anterior con respecto al ángulo de torsión, nos daremos cuenta como varía la longitud de los puntales y cables con respecto a éste, quedando como sigue:

$$\frac{\Delta c}{\Delta \alpha} = \frac{1}{2} \left\{ p^2 + 2r_1r_2 \left[\cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) - \cos \alpha \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \left\{ 2r_1r_2 \left[-\operatorname{sen} \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) + \operatorname{sen} \alpha \right] \right\}$$

$$\frac{\Delta c}{\Delta \alpha} = \frac{1}{2} \left\{ p^2 + 2r_1r_2 \left[\cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) - \cos \alpha \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \left\{ 2r_1r_2 \left[\operatorname{sen} \alpha - \operatorname{sen} \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) \right] \right\}$$

$$\frac{\Delta c}{\Delta \alpha} = \frac{r_1r_2 \left\{ \operatorname{sen} \alpha - \operatorname{sen} \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) \right\}}{\sqrt{p^2 + 2r_1r_2 \left[\cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) - \cos \alpha \right]}}$$

Es importante notar que cuando el sistema está tenso, la diferencia en la longitud del cable será mínima, y por lo tanto la derivada de la ecuación anterior será cero, es decir que no hay proporción de cambio. Quedando la ecuación Como sigue:

$$0 = \frac{r_1 r_2 \left\{ \operatorname{sen} \alpha - \operatorname{sen} \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) \right\}}{\sqrt{p^2 + 2r_1 r_2 \left[\cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) - \cos \alpha \right]}}$$

$$r_1 r_2 \left\{ \operatorname{sen} \alpha - \operatorname{sen} \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) \right\} = 0$$

Por lo tanto en el estado de equilibrio se tendrá:

$$\operatorname{sen} \alpha - \operatorname{sen} \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) = 0$$

$$\operatorname{sen} \left(\frac{360^\circ}{n} + \alpha \right) = \operatorname{sen} \alpha$$

Lo cual por trigonometría esto es sólo posible si:

$$\frac{360^\circ}{n} + \alpha = 180^\circ - \alpha$$

Puesto que:

$$\operatorname{sen} (180^\circ \pm \alpha) = \operatorname{sen} \mp \alpha$$

Por lo tanto resultará que:

$$2\alpha = 180^\circ - \left(\frac{360^\circ}{n} \right)$$

$$\alpha = 90^\circ - \left(\frac{180^\circ}{n} \right) \quad (4.3)$$

Así que el ángulo de torsión es por lo tanto una función de “n” solamente, y es dado por la ecuación (4.3).

A continuación se muestra el ángulo de torsión que deben ser rotados algunos polígonos inscritos en la tapa superior e inferior del cilindro para generar modelos, haciendo uso de la ecuación (4.3).

POLÍGONO INSCRITO	ÁNGULO DE TORSIÓN
Triángulo	30 °
Cuadrado	45 °
Pentágono	54 °
Hexágono	60 °
Heptágono	64.28 °
Octágono	67.5 °

Tabla 1 Ángulos de torsión.

Todos los miembros de la estructura generada deben obedecer a este ángulo, la forma en que se unirán los polígonos superior e inferior es como sigue:
De la figura 3.3 se observa que los puntales irán unidos en el punto dado por el vértice adyacente del polígono inscrito en la tapa superior del cilindro, más el ángulo de torsión. El ángulo de torsión puede ser dado en el sentido de las

manecillas del reloj, o en sentido contrario; pero es importante que todos los elementos sigan la misma dirección, puesto que las ecuaciones generadas obedecerán esta regla.

El punto al que deben llegar los cables laterales “c”, es el mismo que ocupan en la parte inferior, más el ángulo de torsión. Es decir, éstos solo irán inclinados o rotados lo que mande el ángulo de torsión.

Siguiendo estos pasos para las figuras descritas en la tabla 1, el ángulo de torsión entre los polígonos vistos en planta, es como se ilustra en la siguiente figura.

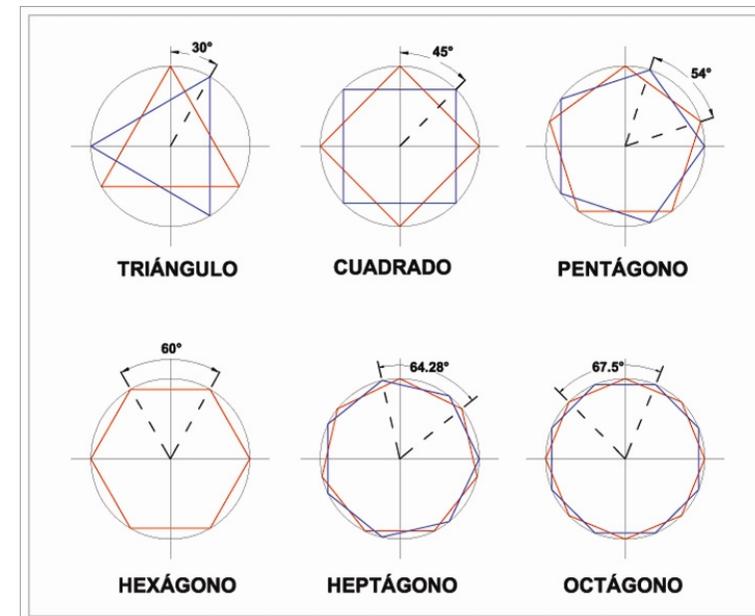


Figura 3.5 Rotación de polígonos inscritos en un cilindro.

Esta claro que el ángulo de torsión está en función del número de lados del polígono que se utilice para generar los modelos, y con el objeto de dejar las ecuaciones para determinar las longitudes de los miembros de éstos, también en función de "n", se sustituirá este ángulo en las ecuaciones (4.1) y (4.2).

Sustituyendo la ecuación (4.3) en la ecuación (4.1) se obtiene:

$$p = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos\left(\frac{360^\circ}{n} + 90^\circ - \frac{180^\circ}{n}\right) + h^2}$$

$$p = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos\left(90^\circ + \frac{360^\circ - 180^\circ}{n}\right) + h^2}$$

$$p = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos\left(90^\circ + \frac{180^\circ}{n}\right) + h^2}$$

Por trigonometría se sabe, que:

$$\cos(90^\circ \pm \theta) = \mp \text{sen } \theta$$

Por lo tanto la ecuación anterior quedará de la siguiente manera:

$$p = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \text{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2} \quad (4.4)$$

Sustituyendo la ecuación (4.3) en (4.2) se tiene:

$$c = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos\left(90^\circ - \frac{180^\circ}{n}\right) + h^2}$$

Por trigonometría se obtiene:

$$c = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \text{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2} \quad (4.5)$$

La longitud del cable "e" se obtiene como se indica a continuación:

De la figura 3.3 se obtiene el siguiente detalle:

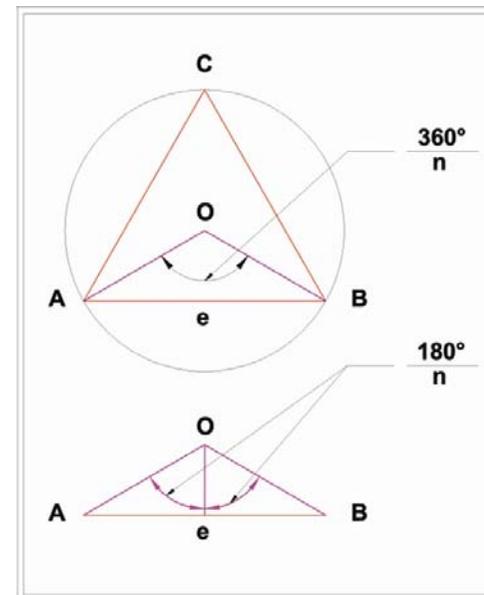


Figura 3.6 Longitud del cable que delimita los polígonos (e).

Del triángulo AOB se forman dos triángulos rectángulos. Un cateto de cada uno de estos dos triángulos rectángulos es igual a $\frac{e}{2} = \overline{AD} = \overline{DB}$. De la figura:

$$e = \overline{AD} + \overline{DB}$$

Del triángulo rectángulo BDO:

$$\operatorname{sen} \frac{180^\circ}{n} = \frac{\overline{DB}}{\overline{OB}}$$

Despejando:

$$\overline{DB} = \overline{OB} \left(\operatorname{sen} \frac{180^\circ}{n} \right)$$

Del triángulo rectángulo ADO:

$$\operatorname{sen} \frac{180^\circ}{n} = \frac{\overline{AD}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{AD}}{\overline{OB}}$$

Despejando:

$$\overline{AD} = \overline{OB} \left(\operatorname{sen} \frac{180^\circ}{n} \right)$$

Por lo tanto:

$$e = \overline{OB} \left(\operatorname{sen} \frac{180^\circ}{n} \right) + \overline{OB} \left(\operatorname{sen} \frac{180^\circ}{n} \right)$$

$$\overline{OB} = r$$

Entonces:

$$e = 2r \left(\operatorname{sen} \frac{180^\circ}{n} \right)$$

Por lo tanto:

$$e = d \operatorname{sen} \left(\frac{180^\circ}{n} \right) \quad (4.6)$$

Donde:

d = diámetro.

En caso de que el prisma tensegrity sea semiuniforme, deberá ser encerrado mediante un cono truncado. Habrá entonces dos longitudes de los cables terminales correspondientes a los dos diámetros, pero de cualquier forma, la ecuación (4.6) sigue aplicando en ambos casos, y lo único que varía es el valor del diámetro que deba introducirse en esta.

3.4 RESUMEN DE FÓRMULAS.

$$p = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2} \quad (4.4)$$

$$c = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2} \quad (4.5)$$

$$e = d \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) \quad (4.6)$$

Donde:

p = Longitud de los puntales.

r1, r2 = Radios del polígono inferior y superior respectivamente.

n = Número de lados del polígono inscrito.

h = Altura del cilindro.

c = Longitud de los cables que unen el polígono inferior con el superior.

e = Longitud de los cables que delimitan los polígonos inscritos en la tapa superior e inferior del cilindro

d = diámetro del cilindro.

3.5 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.

Con la metodología desarrollada, ahora si podemos geometrizar modelos, con “n” número de postes y cuya altura y superficie de apoyo estará designada por nosotros mismos, dependiendo de las necesidades para las cuales este destinado el modelo.

Los siguientes ejemplos son modelos con 3, 4, y 5 postes, en los cuales esta aplicada la metodología, con valores tomados arbitrariamente, el objetivo de estos ejemplos, es únicamente demostrar la utilidad de las fórmulas para posteriormente, decidir cual de los tres modelos anteriores facilita la generación de armaduras, para el fin antes mencionado.

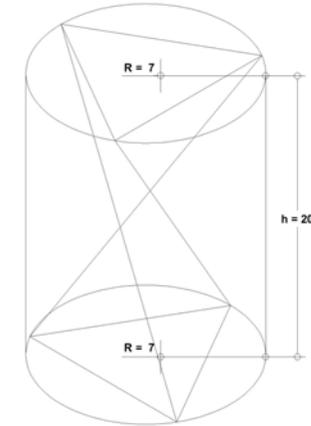
Esto con la finalidad de nutrir las herramientas de diseño del arquitecto; para los tres ejemplos desarrollados se utilizaron las mismas dimensiones del cilindro únicamente varió el número de postes.

MODELO TENSEGRITY DE PRISMA CIRCULAR RECTO CON TRES POSTES.

Dimensiones del cilindro

Radio = 7 cm

Altura = 20 cm



Cálculo de longitud de elementos.

1.- POSTES.

$$p = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2}$$

$$p = \sqrt{(7)^2 + (7)^2 + 2(7)(7) \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{3}\right) + (20)^2}$$

$$p = \sqrt{98 + 98 \operatorname{sen}60^\circ + 400}$$

$$p = 24.14 \text{ cm}$$

2.-CABLES LATERALES.

$$c = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2}$$

$$c = \sqrt{(7)^2 + (7)^2 - 2(7)(7)\operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{3}\right) + (20)^2}$$

$$c = \sqrt{98 - 98\operatorname{sen}60^\circ + 400}$$

$$c = 20.32 \text{ cm}$$

2.-CABLES TERMINALES.

$$e = d \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right)$$

$$e = 14 \operatorname{sen}60^\circ$$

$$e = 12.12 \text{ cm}$$



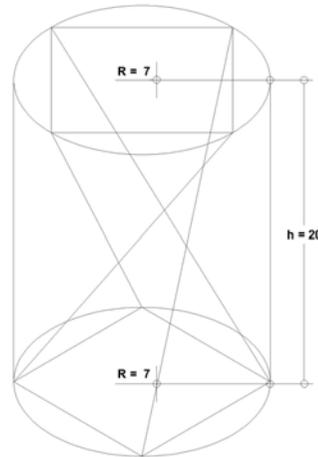
Figura 3.7 Vistas del modelo terminado.

MODELO TENSEGRITY DE PRISMA CIRCULAR RECTO CON CUATRO POSTES.

Dimensiones del cilindro

Radio = 7 cm

Altura = 20 cm



Cálculo de longitud de elementos.

1.- POSTES.

$$p = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2}$$

$$p = \sqrt{(7)^2 + (7)^2 + 2(7)(7)\operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{4}\right) + (20)^2}$$

$$p = \sqrt{98 + 98\operatorname{sen}45^\circ + 400}$$

$$p = 23.81 \text{ cm}$$

2.-CABLES LATERALES.

$$c = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2}$$

$$c = \sqrt{(7)^2 + (7)^2 - 2(7)(7)\operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{4}\right) + (20)^2}$$

$$c = \sqrt{98 - 98\operatorname{sen}45^\circ + 400}$$

$$c = 20.70 \text{ cm}$$

2.-CABLES TERMINALES.

$$e = d \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right)$$

$$e = 14\operatorname{sen}45^\circ$$

$$e = 9.89 \text{ cm}$$



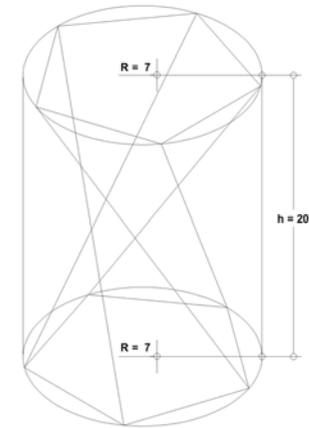
Figura 3.8 Vistas del modelo terminado.

MODELO TENSEGRITY DE PRISMA CIRCULAR RECTO CON CINCO POSTES.

Dimensiones del cilindro

Radio = 7 cm

Altura = 20 cm



Cálculo de longitud de elementos.

1.- POSTES.

$$p = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2}$$

$$p = \sqrt{(7)^2 + (7)^2 + 2(7)(7)\operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{5}\right) + (20)^2}$$

$$p = \sqrt{98 + 98\operatorname{sen}36^\circ + 400}$$

$$p = 23.57 \text{ cm}$$

2.-CABLES LATERALES.

$$c = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2}$$

$$c = \sqrt{(7)^2 + (7)^2 - 2(7)(7)\operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{5}\right) + (20)^2}$$

$$c = \sqrt{98 - 98\operatorname{sen}36^\circ + 400}$$

$$c = 20.98 \text{ cm}$$

2.-CABLES TERMINALES.

$$e = d\operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right)$$

$$e = 14\operatorname{sen}36^\circ$$

$$e = 8.22 \text{ cm}$$



Figura 3.9 Vistas del modelo terminado.

3.6 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.

Núm. de Postes	Ángulo de Torsión	Longitud de Elementos		
		Postes	Cables Laterales	Cables "e"
3	30°	24.14 cm	20.32 cm	12.12 cm
4	45°	23.81 cm	20.70 cm	9.89 cm
5	54°	23.57 cm	20.98 cm	8.22 cm

Tabla Comparativa.

- Es en este último modelo en el que el número de componentes es menor (tres postes y nueve cables), y brinda las mismas posibilidades geométricas para generar armaduras, que un modelo con mayor número de postes.
- También con este modelo se logra mayor ligereza, debido a su reducido número de componentes.

Tomando en cuenta la interpretación de los resultados, considero que el modelo de tres postes cumple con las características necesarias para generar una armadura que funcione de manera óptima y brinde ligereza estructural además de mayor estabilidad.

- Entre mayor sea "n" (número de postes) la longitud de los postes disminuye, la longitud de los cables laterales aumenta y los cables "e" (los que delimitan el polígono) disminuyen.
- Con el modelo de tres postes se logra mayor rigidez y estabilidad, debido a que el polígono generado es un triángulo (figura geométrica más estable).

4

CAPÍTULO

PROPUESTA

**“Nada hermoso es fácil,
pero todo es posible”**

Mercedes de Acosta

4 PROPUESTA.

4.1 INTRODUCCIÓN.

Ya desarrollada la metodología y una vez que se ha puesto en práctica, estamos listos para desarrollar una propuesta que sea lo más completa posible, arquitectónicamente hablando.

Los lineamientos que seguiremos serán los siguientes:

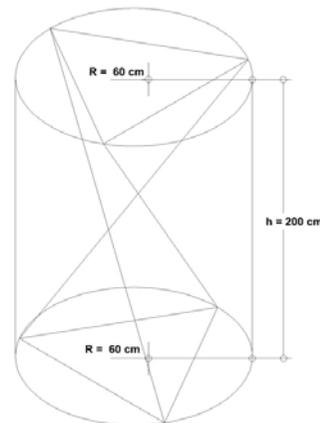
- Se desarrollará una armadura basándose en el principio de Tensegrity, utilizando módulos con tres postes.
- El claro a salvar es de veinte metros.
- Se utilizará un módulo prismático regular con tres postes.

4.2 CÁLCULO GEOMÉTRICO DEL MÓDULO.

Dimensiones del cilindro

Radio = 60 cm

Altura = 200 cm



Cálculo de longitud de elementos.

1.- Postes.

$$p = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2}$$

$$p = \sqrt{(60)^2 + (60)^2 + 2(60)(60)\operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{3}\right) + (200)^2}$$

$$p = \sqrt{7200 + 7200 \operatorname{sen} 60^\circ + 40000}$$

$$p = 231.16 \text{ cm}$$

2.-Cables Laterales.

$$c = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + h^2}$$

$$c = \sqrt{(60)^2 + (60)^2 - 2(60)(60)\operatorname{sen}\left(\frac{180^\circ}{3}\right) + (200)^2}$$

$$c = \sqrt{7200 - 7200 \operatorname{sen} 60^\circ + 40000}$$

$$c = 202.39 \text{ cm}$$

2.-Cables Terminales.

$$e = d \operatorname{sen} \left(\frac{180^\circ}{n} \right)$$

$$e = 120 \operatorname{sen} 60^\circ$$

$$e = 103.92 \text{ cm}$$

4.3 MÉTODO DE UNIÓN ENTRE MÓDULOS.

PASO UNO: Una vez calculadas las longitudes de los elementos, el siguiente paso es geometrizar un módulo con las dimensiones ya establecidas.

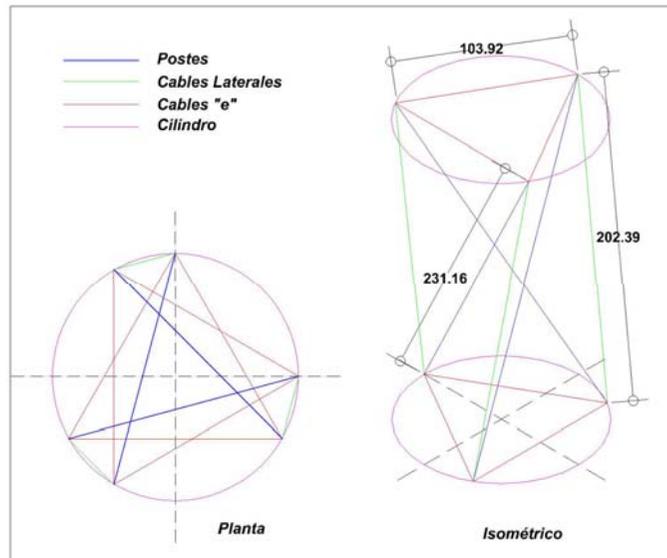


Figura 4.0 Concepción Geométrica de un módulo con las dimensiones antes calculadas.

PASO DOS: Se traslada el punto **a** al plano horizontal (ver figura 4.1).

PASO TRES: Se une **a'** con **b** para ubicar el **eje y** que es perpendicular al **eje x** (ver figura 4.1).

PASO CUATRO: El punto **O** se ubica a la mitad de la distancia entre **b** y **a'** (ver figura 4.1).

PASO CINCO: El punto **O** se copia a cada 0.94 m sobre el **eje x**, y este será el punto de referencia para copiar cada módulo (ver figura 4.1).

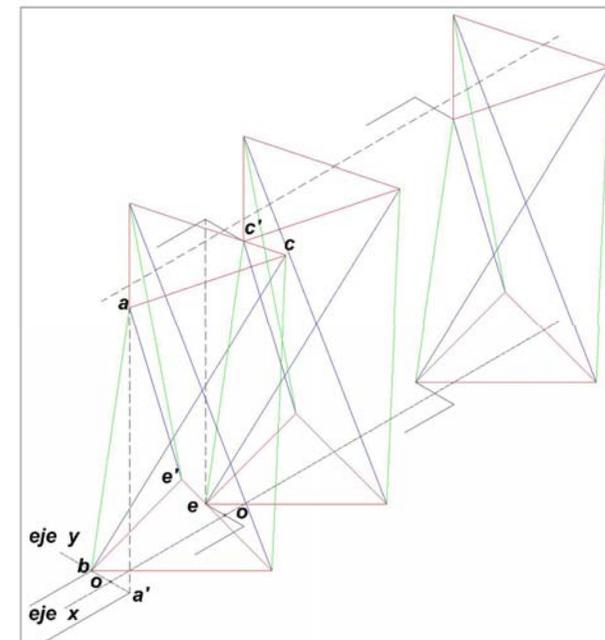


Figura 4.1 Vista en isométrico del método de unión entre módulos.

NOTA: La distancia entre los puntos **e** y **e'** ubicados en la base, es igual a la distancia entre los puntos **c** y **c'** de la parte superior (ver figura 4.1).

PASO SEIS: La planta queda de la siguiente manera y con los siguientes ángulos (ver figura 4.2).

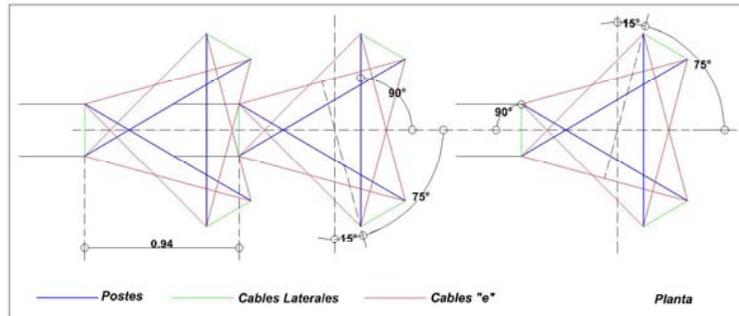
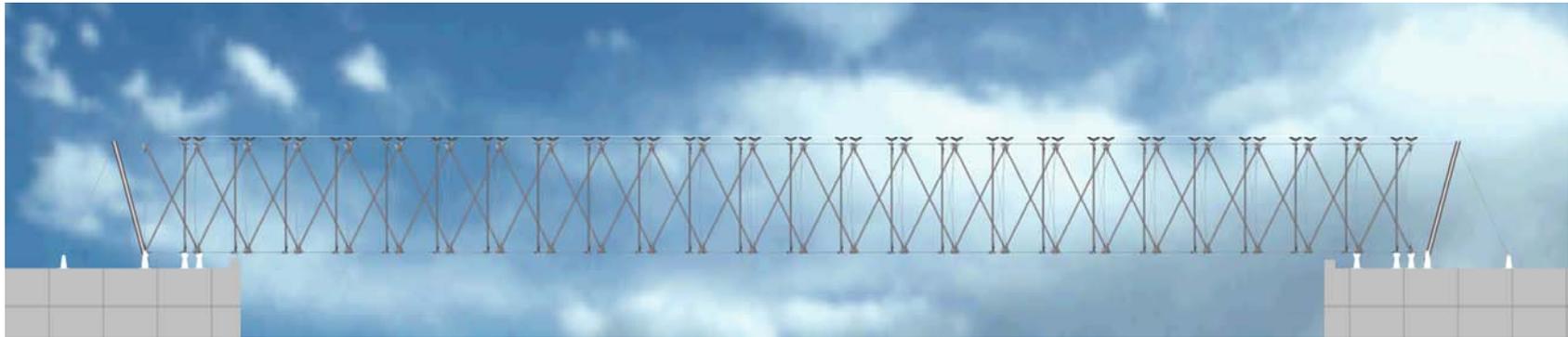


Figura 4.2 Vista en planta de la unión de los módulos.

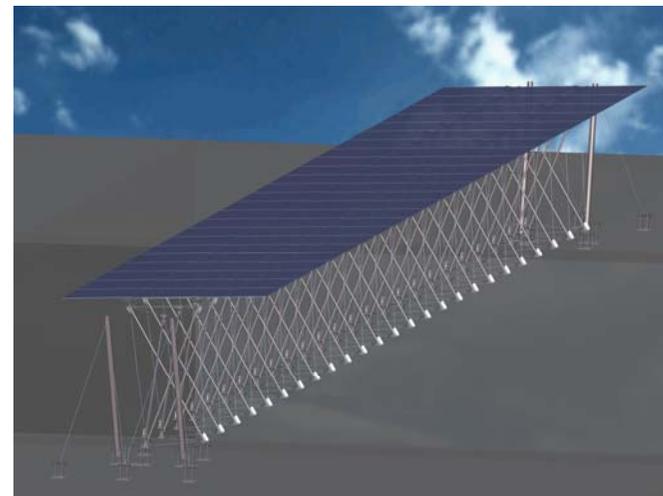
4.4 RENDERS.



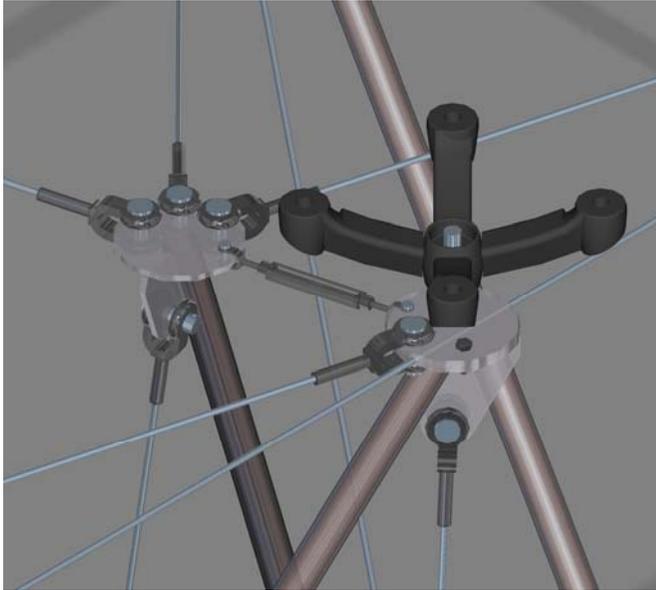
VISTA LATERAL



VISTA FRONTAL



ISOMÉTRICO

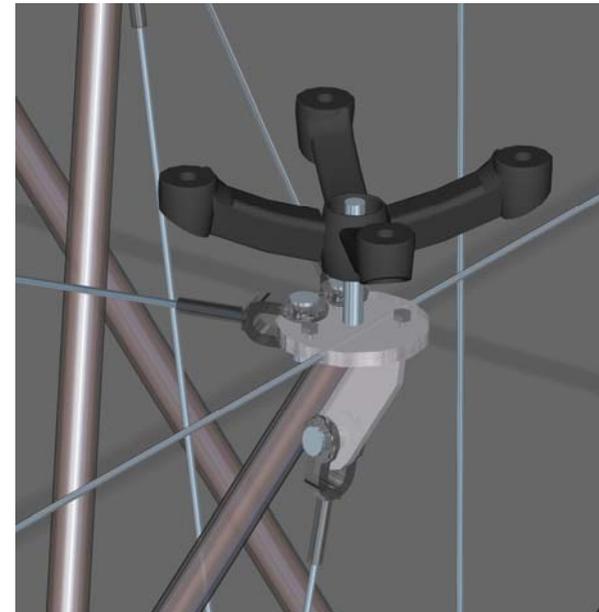


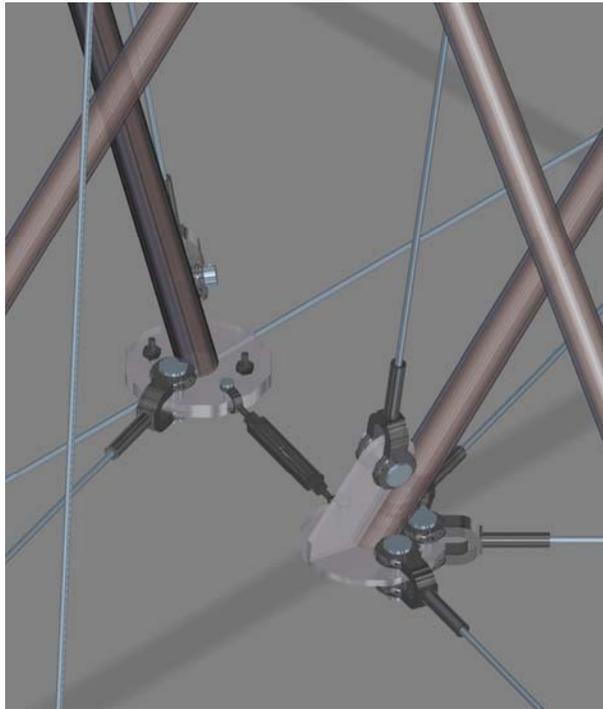
DETALLE DE NODOS SUPERIORES

En estas imágenes se muestran los nodos superiores, sobre los cuales se sujeta la manija metálica “araña” con la cual se sujetará el cristal de la cubierta, estas manijas regulan su altura con el perno, ubicado al centro de la placa circular.

Todas las terminales usadas son de ¼” marca Crosby, el cable es de acero de ¼ “ tipo barracuda marca Camesa.

Las placas van unidas al tubo con soldadura en cordón.

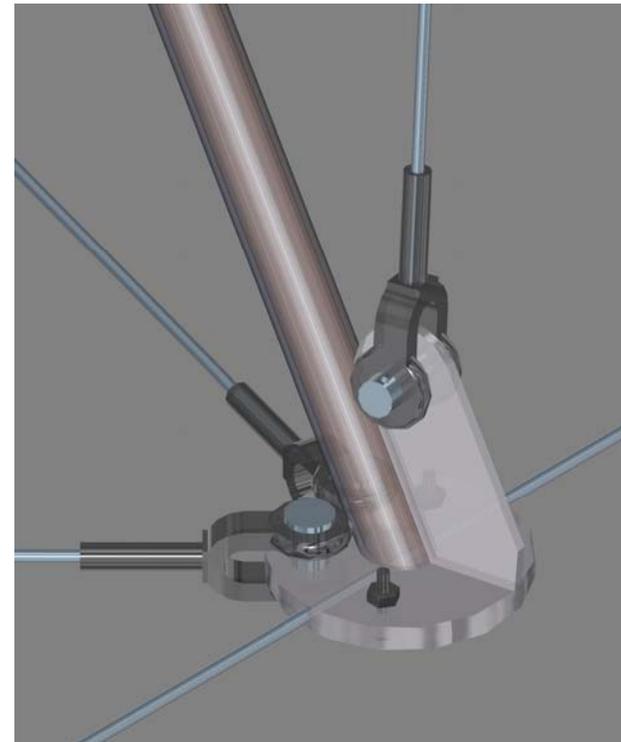




Las distancia entre los dos nodos de esta imagen esta regulada por un templador de quijada y quijada de ¼" marca Crosby.

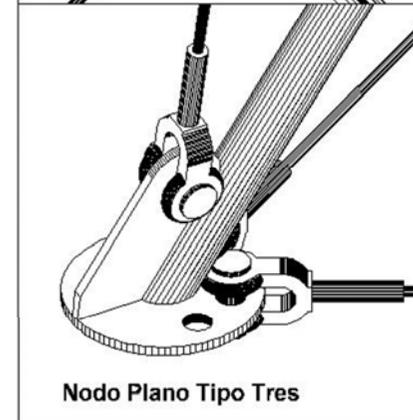
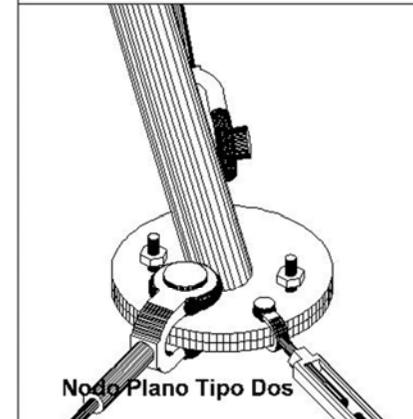
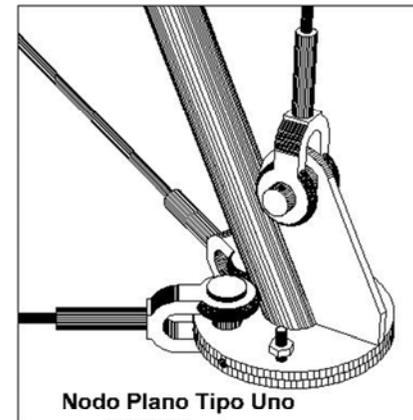
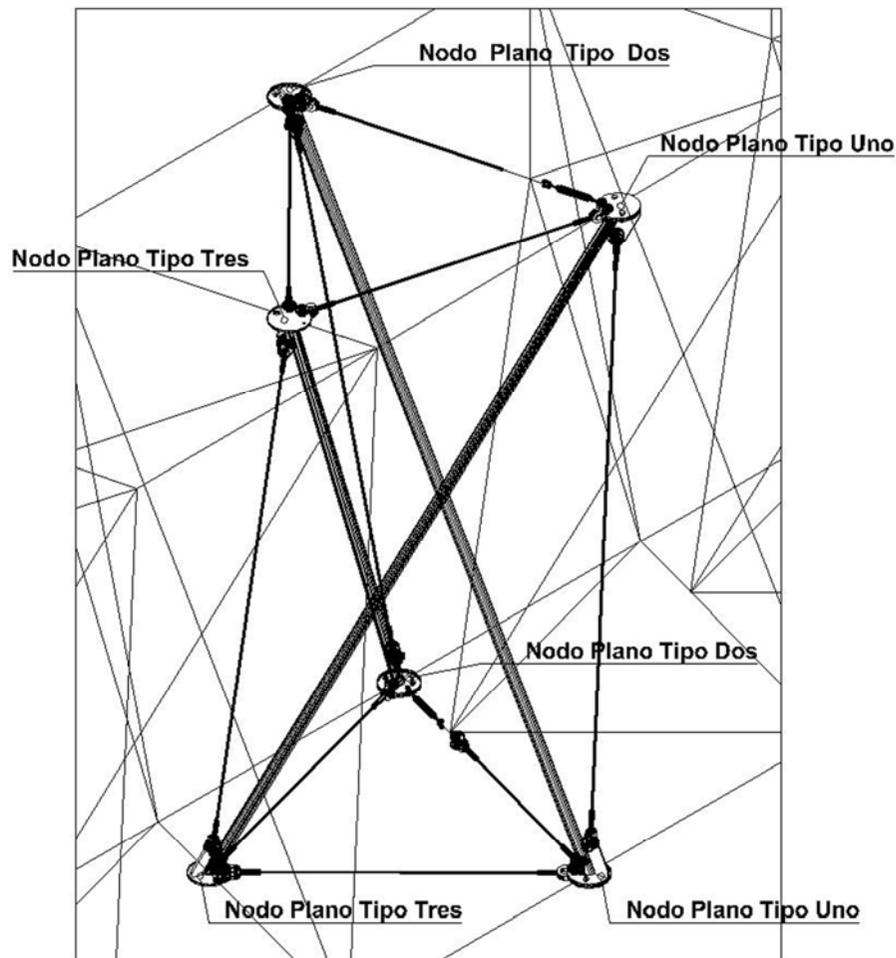
DETALLE DE NODOS INFERIORES

Vistas en isométrico de los nodos inferiores, al igual que los superiores, las placas van unidas al tubo con soldadura en cordón.



IMAGENES DE LA MAQUETA.





NOTAS

Esta propuesta no está desarrollada completamente, debido a que la finalidad es únicamente demostrar la utilidad de la metodología.

Asesores:

Dr. Mario de Jesús Carmona Y Pardo

Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas

Dr. Agustín Hernández Hernández

Alumno:

Edgar Reyes Nieto

TENSEGURITY

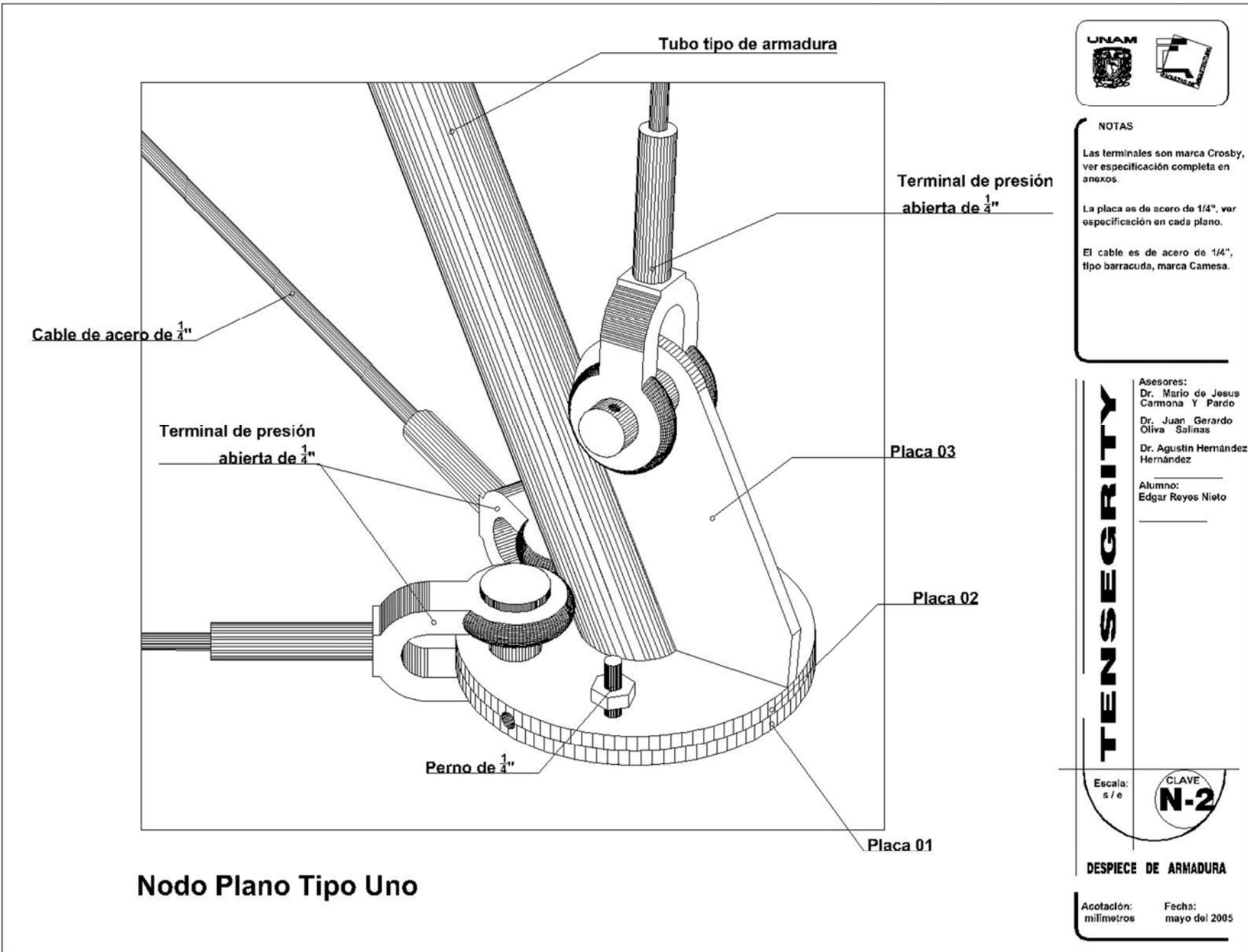
Escala:
s/e

CLAVE
N-1

DESPIECE DE ARMADURA

Acotación:
milímetros

Fecha:
mayo del 2005



Nodo Plano Tipo Uno



NOTAS

Las terminales son marca Crosby, ver especificación completa en anexos.
 La placa es de acero de 1/4", ver especificación en cada plano.
 El cable es de acero de 1/4", tipo barracuda, marca Cameca.

Asesores:
 Dr. Mario de Jesús Carmona Y Pardo
 Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas
 Dr. Agustín Hernández Hernández
 Alumno:
 Edgar Reyes Nieto

TENSEGURITY



DESPIECE DE ARMADURA

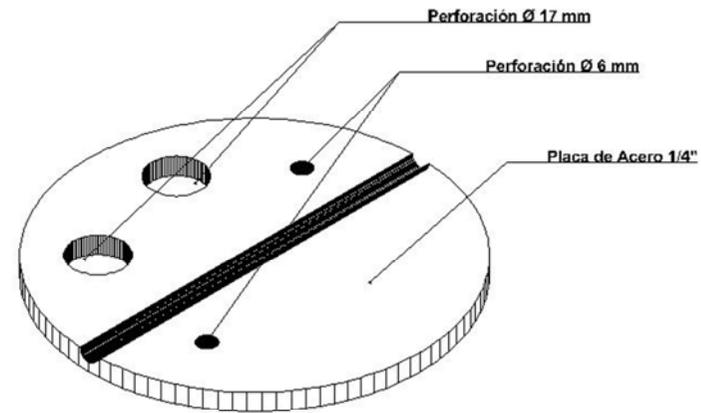
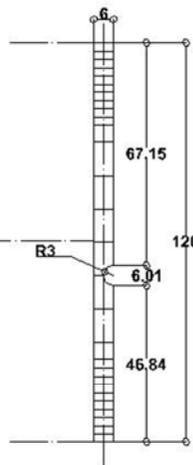
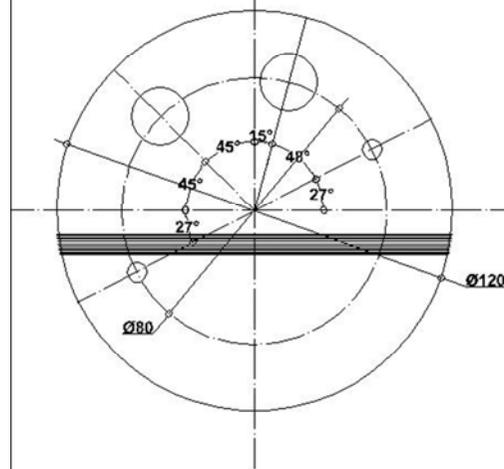
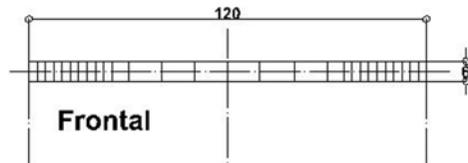
Acotación: milímetros Fecha: mayo del 2005

Despiece Nodo Plano Tipo Uno Placa 01



NOTAS

Las especificación de 1/4" en placa de acero se decidió porque es el espesor mínimo recomendable para este tipo de elementos estructurales.



Isométrico



Asesores:
Dr. Mario de Jesús Carmona Y Pardo
Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas
Dr. Agustín Hernández Hernández

Alumno:
Edgar Reyes Nieto

TENSEGRITY

Escala:
1 : 2

CLAVE
N-3

DESPIECE DE ARMADURA

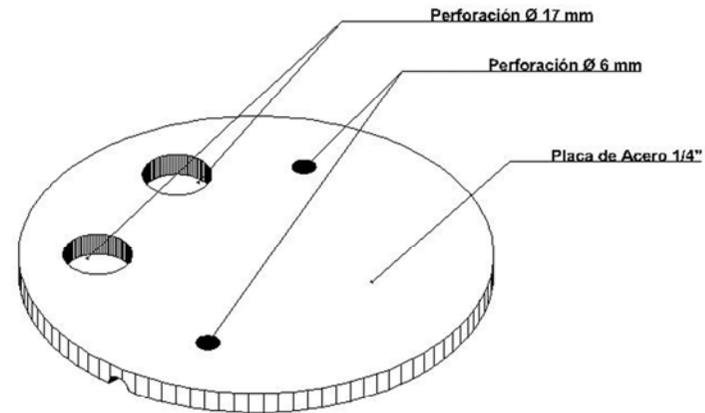
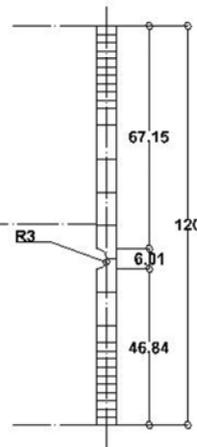
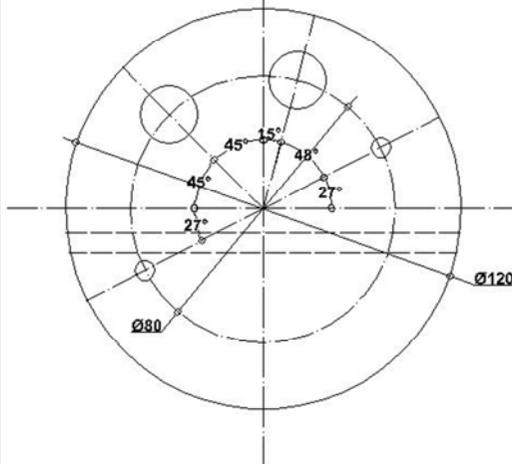
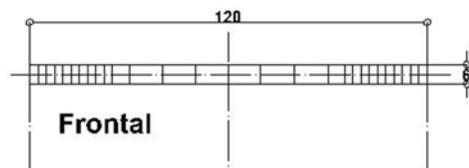
Acotación: Fecha:
milímetros mayo del 2005

Despiece Nodo Plano Tipo Uno Placa 02



NOTAS

Las especificación de 1/4" en placa de acero se decidió porque es el espesor mínimo recomendable para este tipo de elementos estructurales.



Asesores:
Dr. Mario de Jesús Carmona Y Pardo
Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas
Dr. Agustín Hernández Hernández

Alumno:
Edgar Reyes Nieto

TENSEGRITY

Escala:
1 : 2

CLAVE
N-4

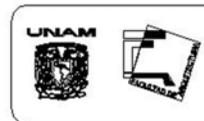
DESPIECE DE ARMADURA

Acotación:
milímetros

Fecha:
mayo del 2005

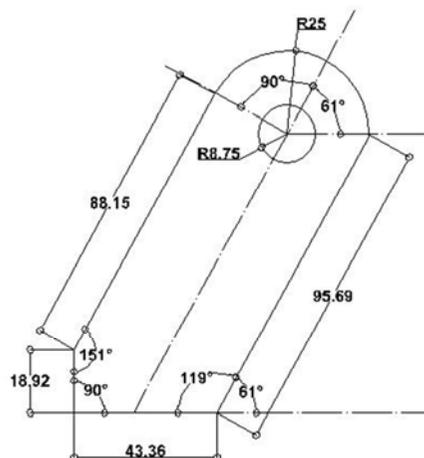
Despiece Nodo Plano Tipo Uno

Placa 03

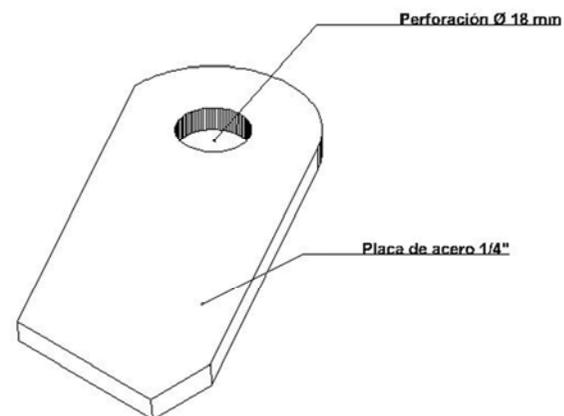


NOTAS

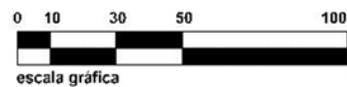
Las especificación de 1/4" en placa de acero se decidió porque es el espesor mínimo recomendable para este tipo de elementos estructurales.



Planta



Isométrico



Asesores:
 Dr. Mario de Jesús Carmona Y Pardo
 Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas
 Dr. Agustín Hernández Hernández
 Alumno:
 Edgar Reyes Nieto

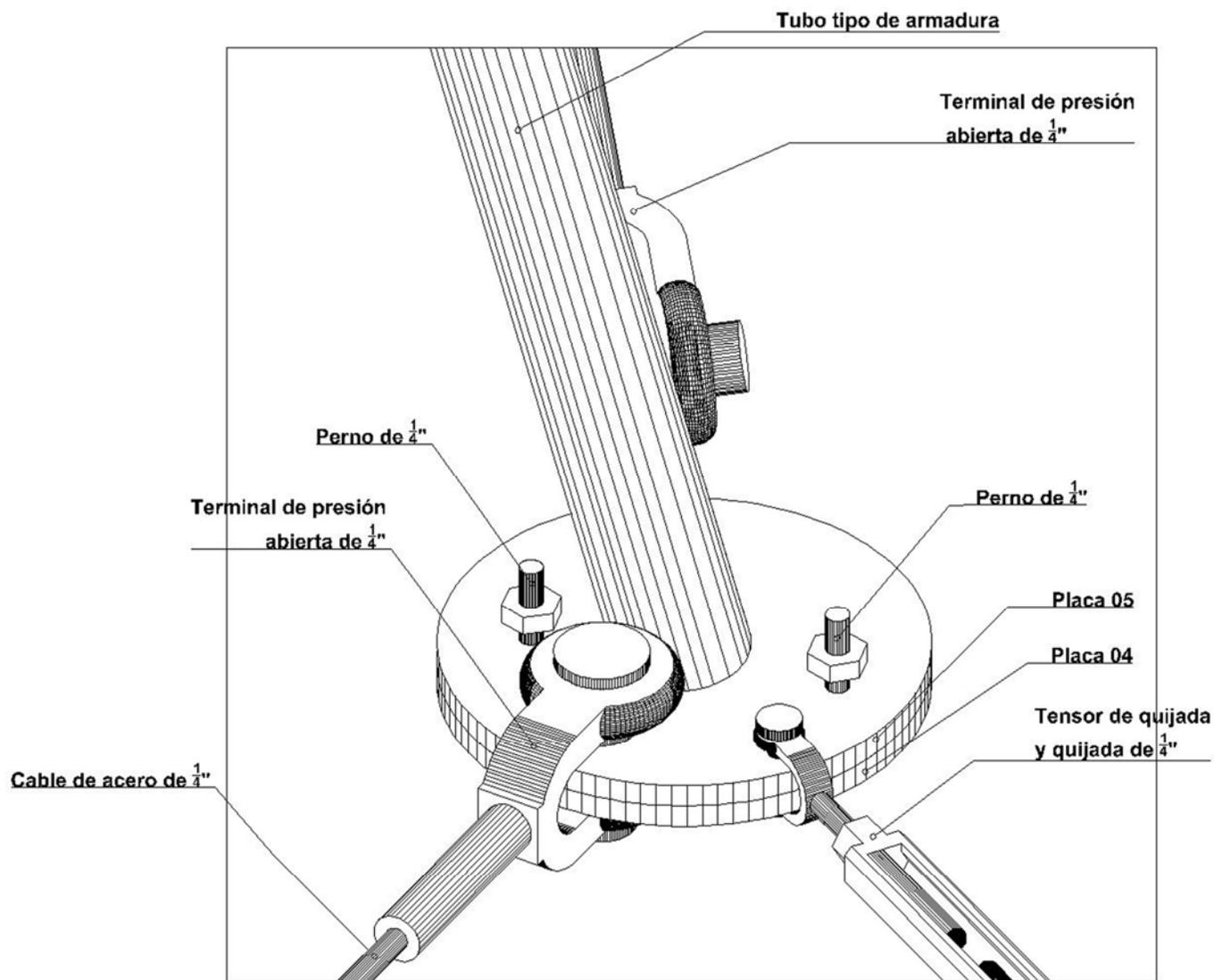
TENSEGURITY

Escala:
1 : 2

CLAVE
N-5

DESPIECE DE ARMADURA

Acotación: milímetros Fecha: mayo del 2005



Nodo Plano Tipo Dos



NOTAS

Las terminales son marca Crosby, ver especificación completa en anexos.

La placa es de acero de 1/4", ver especificación en cada plano.

El cable es de acero de 1/4", tipo barracuda, marca Camesa, ver especificación en anexos.

Las templadores son marca Crosby, ver especificación en anexos.

Asesores:

Dr. Mario de Jesús Carmona Y Pardo

Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas

Dr. Agustín Hernández Hernández

Alumno:

Edgar Reyes Nieto

TENSEGURITY

Escala:
s / e

CLAVE
N-6

DESPIECE DE ARMADURA

Acotación:
milímetros

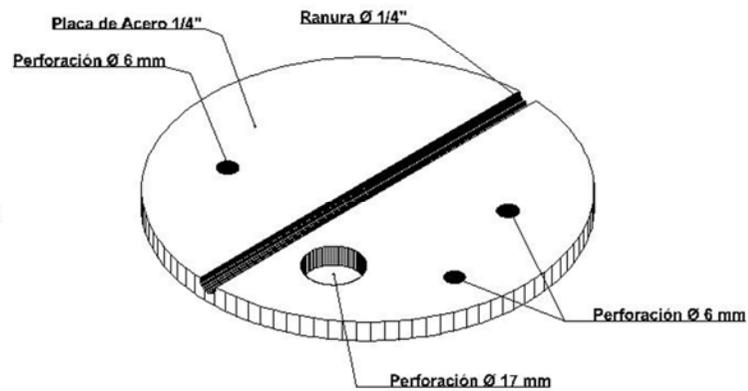
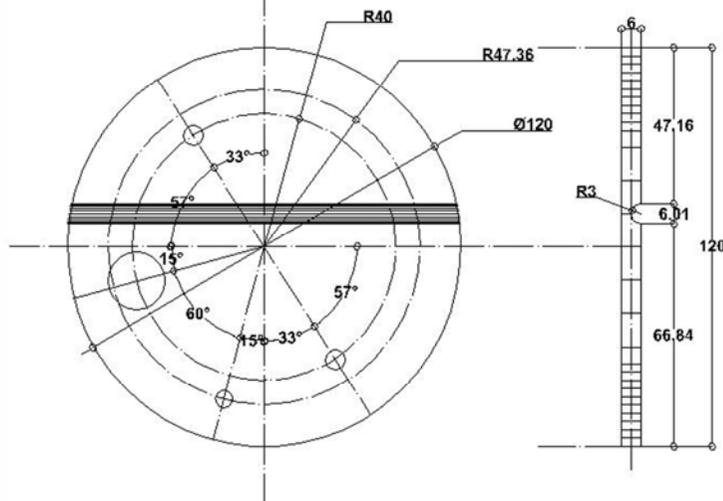
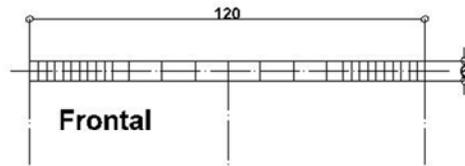
Fecha:
mayo del 2005

Despiece Nodo Plano Tipo Dos Placa 04



NOTAS

Las especificación de 1/4" en placa de acero se decidió porque es el espesor mínimo recomendable para este tipo de elementos estructurales.



Planta

Lateral

Isométrico



Asesores:
Dr. Mario de Jesús Carmona Y Pardo
Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas
Dr. Agustín Hernández Hernández

Alumno:
Edgar Reyes Nieto

TENSEGURITY

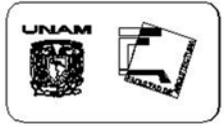
Escala:
1 : 2

CLAVE
N-7

DESPIECE DE ARMADURA

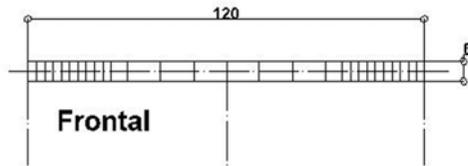
Acotación: Fecha:
milímetros mayo del 2005

Despiece Nodo Plano Tipo Dos Placa 05

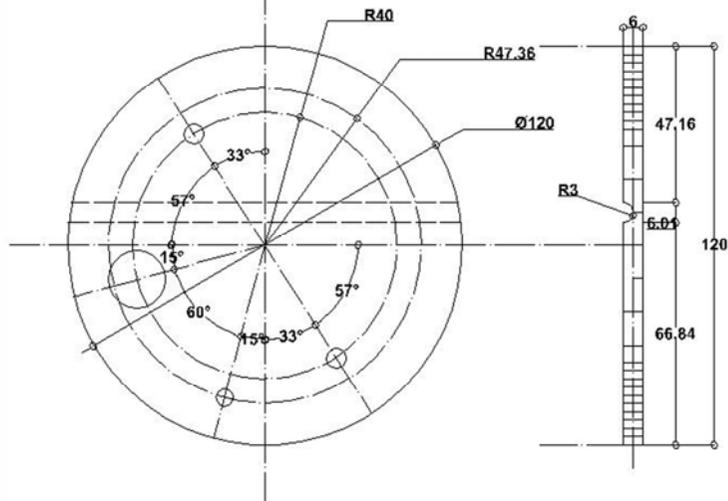


NOTAS

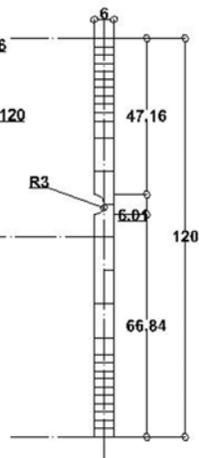
Las especificación de 1/4" en placa de acero se decidió porque es el espesor mínimo recomendable para este tipo de elementos estructurales.



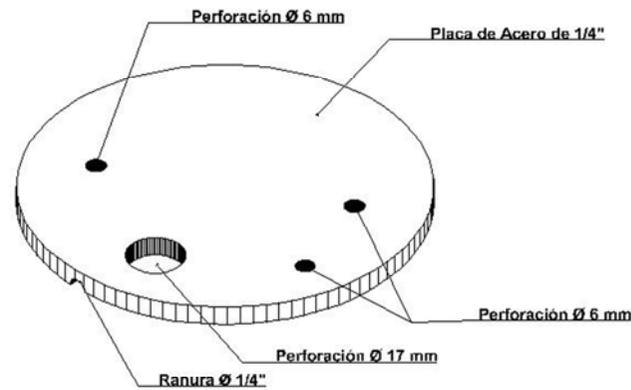
Frontal



Planta



Lateral



Isométrico



Asesores:
 Dr. Mario de Jesús Carmona Y Pardo
 Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas
 Dr. Agustín Hernández Hernández
 Alumno:
 Edgar Reyes Nieto

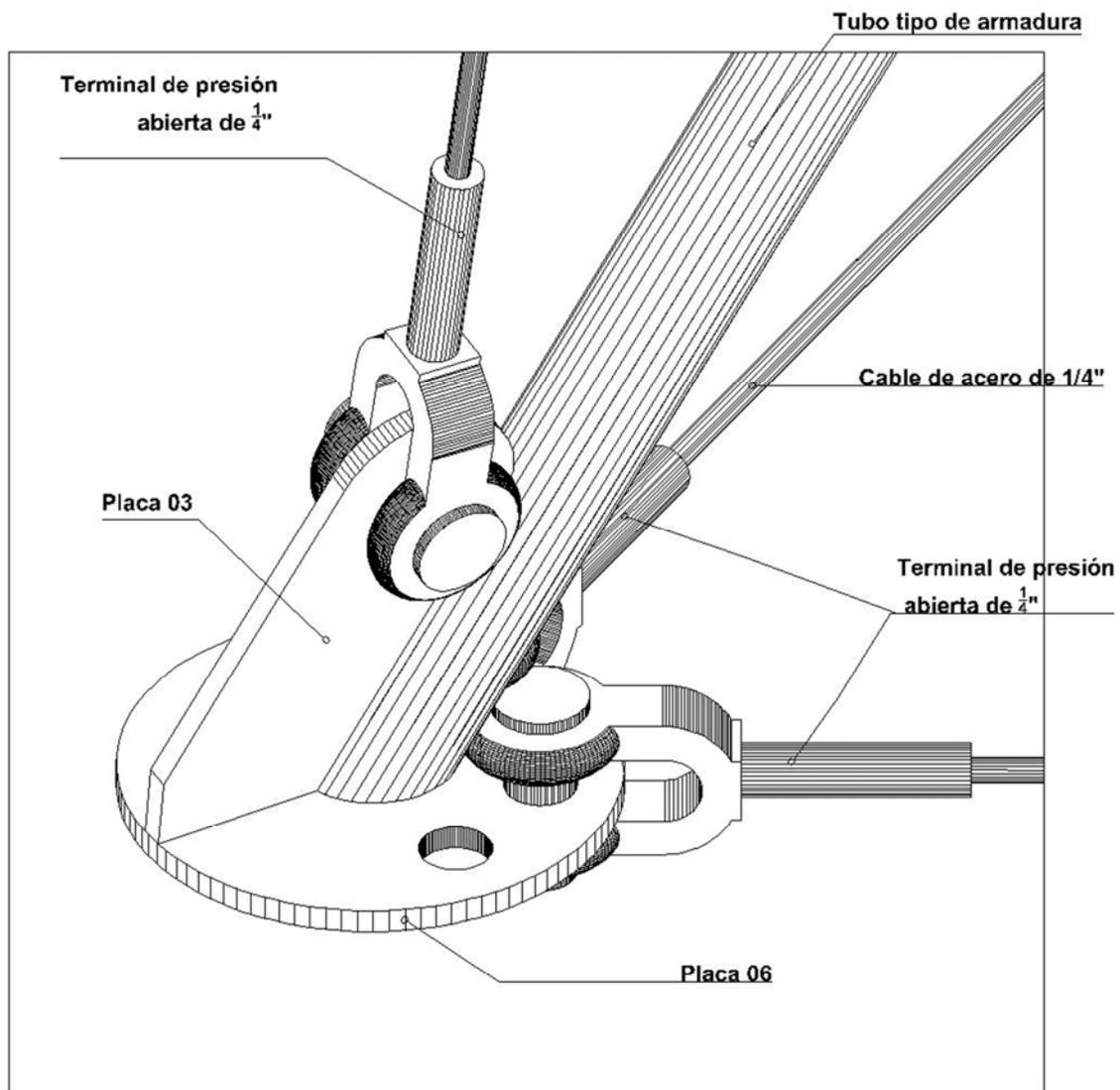
TENSEGURITY

Escala:
1 : 2

CLAVE
N-8

DESPIECE DE ARMADURA

Acotación: milímetros Fecha: mayo del 2005



Nodo Plano Tipo Dos



NOTAS

Las terminales son marca Crosby, ver especificación completa en anexos.

La placa es de acero de 1/4", ver especificación en cada plano.

El cable es de acero de 1/4", tipo barracuda, marca Cameca, ver especificación en anexos.

Las templadores son marca Crosby, ver especificación en anexos.

Asesores:

Dr. Mario de Jesús Carmona Y Pardo

Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas

Dr. Agustín Hernández Hernández

Alumno:

Edgar Reyes Nieto

TENSEGURITY

Escala:
s/e

CLAVE
N-9

DESPIECE DE ARMADURA

Acotación:
milímetros

Fecha:
mayo del 2005

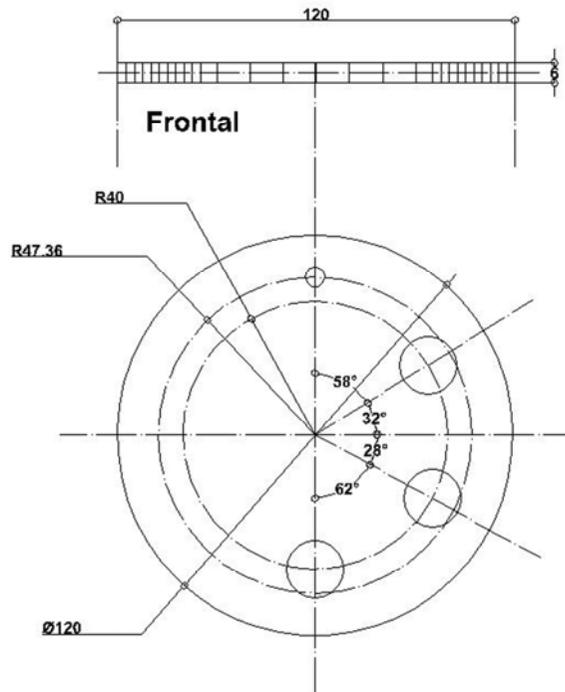
Despiece Nodo Plano Tipo Dos

Placa 06

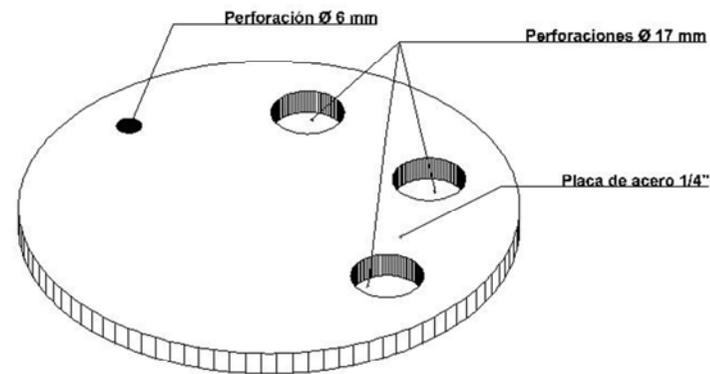


NOTAS

Las especificación de 1/4" en placa de acero se decidió porque es el espesor mínimo recomendable para este tipo de elementos estructurales.



Planta



Isométrico



Asesores:
 Dr. Mario de Jesús Carmona Y Pardo
 Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas
 Dr. Agustín Hernández Hernández
 Alumno:
 Edgar Reyes Nieto

TENSEGRITY

Escala:
1 : 2

CLAVE
N-10

DESPIECE DE ARMADURA

Acotación: milímetros Fecha: mayo del 2005

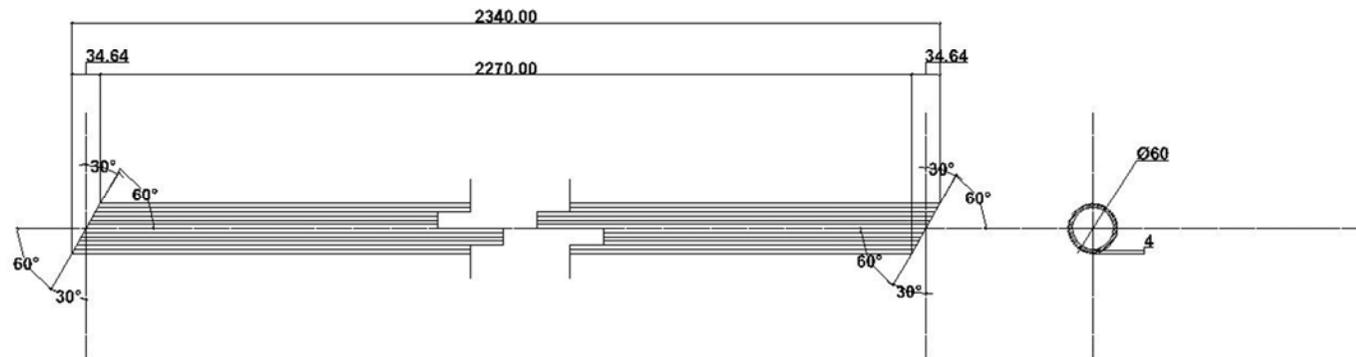
Tubo Tipo de Armadura



NOTAS

Tubo circular OC de acero de 2" 60 x 3.91 mm

Ver especificación completa en anexos.



Asesores:
 Dr. Mario de Jesús Carmona Y Pardo
 Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas
 Dr. Agustín Hernández Hernández
 Alumno:
 Edgar Reyes Nieto

TENSEGRITY

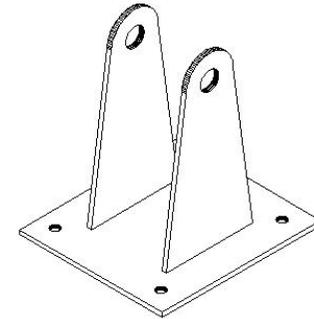
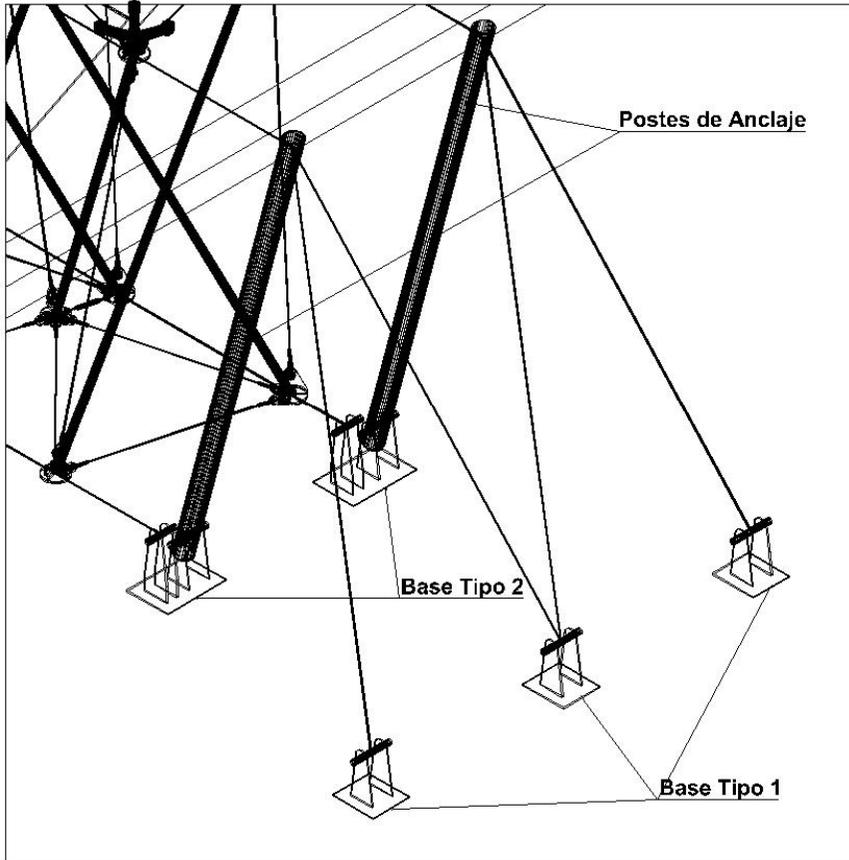
Escala: 1 : 2

CLAVE
N-11

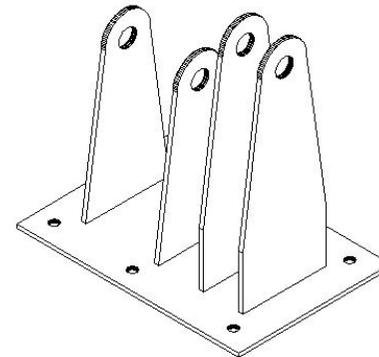
DESPIECE DE ARMADURA

Acotación: milímetros Fecha: mayo del 2005

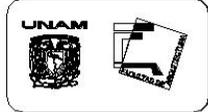
Bases de Anclaje para Armadura



Base Tipo 1



Base Tipo 2



NOTAS

Las especificación de 1/4" en placa de acero se decido porque es el espesor mínimo recomendable para este tipo de elementos estructurales.

Las placas están unidas con soldadura en cordón.

Asesores:
 Dr. Mario de Jesus Carmona Y Pardo
 Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas
 Dr. Agustin Hernández Hernández
 Alumno:
 Edgar Reyes Nieto

TENSECRITY

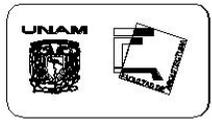
Escala:
 s/e

CLAVE
B-1

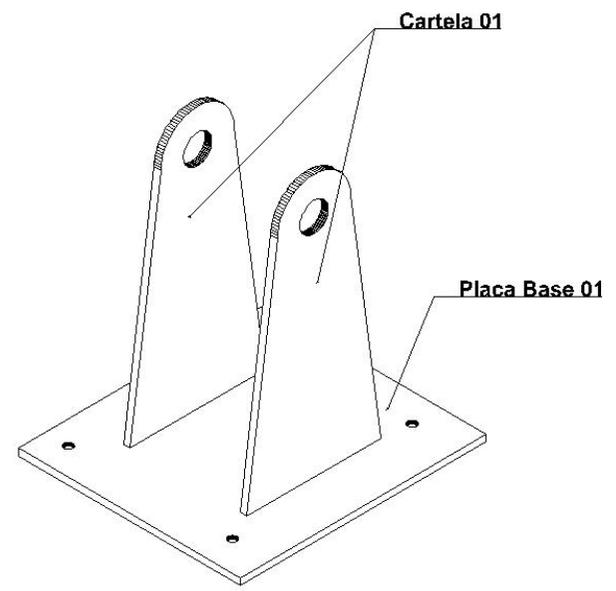
DESPIECE DE ARMADURA

Acotación:
 milímetros

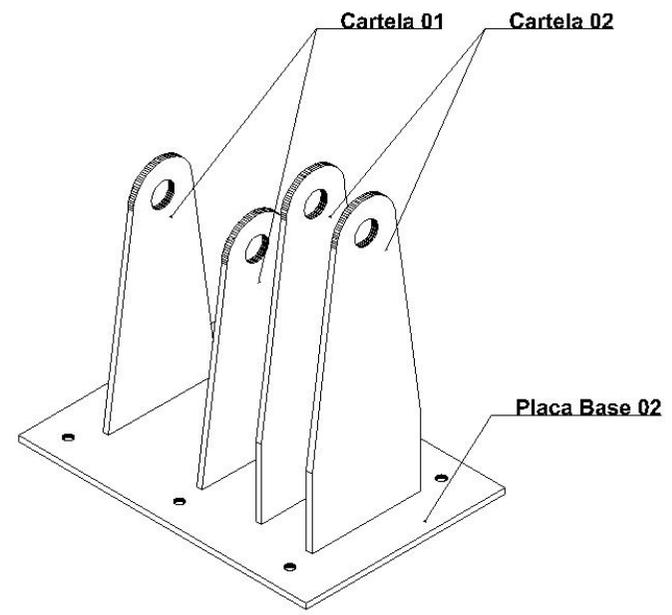
Fecha:
 mayo del 2005



Despiece de Base Tipo 1



Despiece de Base Tipo 2



NOTAS

Las especificación de 1/4" en placa de acero se decido porque es el espesor mínimo recomendable para este tipo de elementos estructurales.

Las placas están unidas con soldadura en cordón.

Asesores:
Dr. Mario de Jesus Carmona Y Pardo
Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas
Dr. Agustin Hernández Hernández
Alumno:
Edgar Reyes Nieto

TENSECRITY

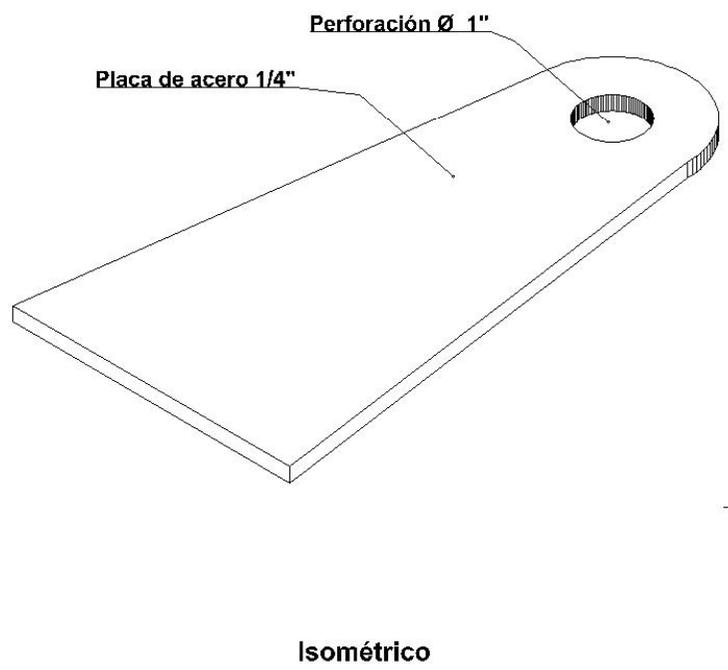
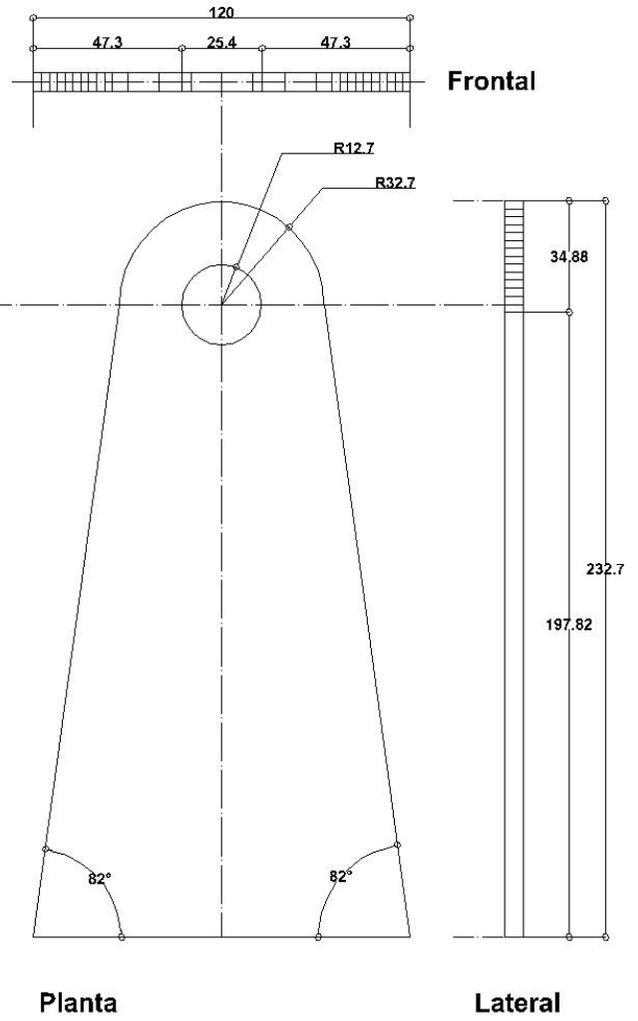
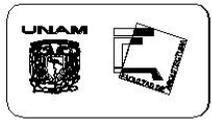
Escala: s/e



DESPIECE DE ARMADURA

Acotación: milímetros Fecha: mayo del 2005

Cartela 01



NOTAS

Las especificación de 1/4" en placa de acero se decido porque es el espesor mínimo recomendable para este tipo de elementos estructurales.

Las placas están unidas con soldadura en cordón.

Asesores:
 Dr. Mario de Jesus Carmona Y Pardo
 Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas
 Dr. Agustín Hernández Hernández
 Alumno:
 Edgar Reyes Nieto

TENSECRITY

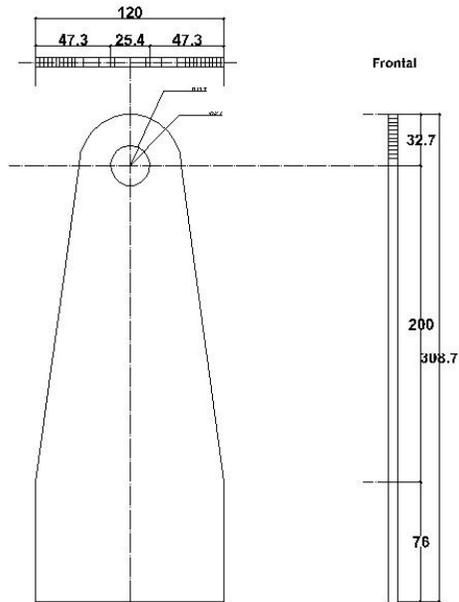
Escala:
 1 : 2

CLAVE
B-3

DESPIECE DE ARMADURA

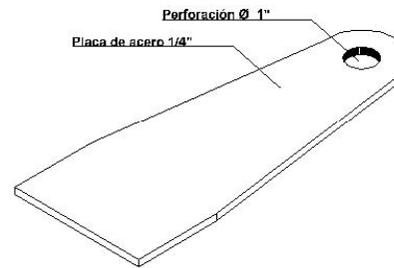
Acotación: milímetros Fecha: mayo del 2005

Cartela 02

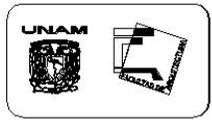


Planta

Lateral



Isométrico



NOTAS

Las especificación de 1/4" en placa de acero se decidió porque es el espesor mínimo recomendable para este tipo de elementos estructurales.

Las placas están unidas con soldadura en cordón.

Asesores:
 Dr. Mario de Jesús Carmona Y Pardo
 Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas
 Dr. Agustín Hernández Hernández

Alumno:
 Edgar Reyes Nieto

TENSECRITY

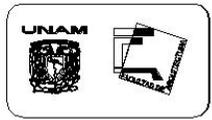
Escala:
 1 : 2

CLAVE
B-4

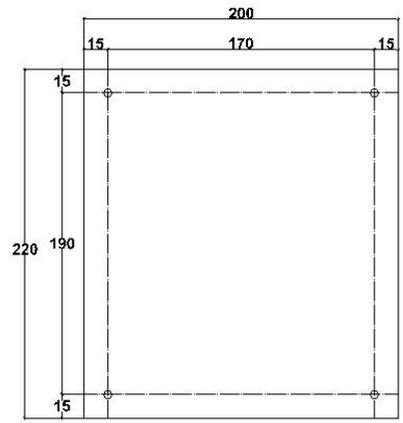
DESPIECE DE ARMADURA

Acotación:
 milímetros

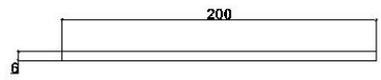
Fecha:
 mayo del 2005



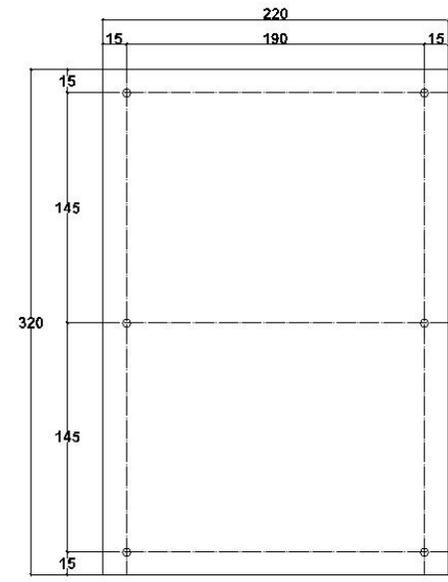
Placa Base 01



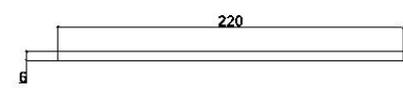
Planta



Placa Base 02



Planta



NOTAS

Las especificación de 1/4" en placa de acero se decidió porque es el espesor mínimo recomendable para este tipo de elementos estructurales.
 Las placas están unidas con soldadura en cordón.
 Las perforaciones son de 1/4"

Asesores:
 Dr. Mario de Jesús Carmona Y Pardo
 Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas
 Dr. Agustín Hernández Hernández
 Alumno:
 Edgar Reyes Nieto

TENSECRITY

Escala:
 1 : 2



DESPIECE DE ARMADURA

Acotación: milímetros Fecha: mayo del 2005

5

CAPÍTULO

CONCLUSIONES

**“Si un poco de conocimiento es peligroso,
¿Qué hombre está fuera de peligro?”**

T. H. Huxley

5 CONCLUSIONES.

5.1 TESIS TEÓRICO-PRÁCTICA.

La conclusión más importante a la que he llegado, al concluir este trabajo, es el desarrollo de una armadura, utilizando el sistema estructural Tensegrity, como resultado de la investigación realizada, a lo largo de este tiempo; y que nos brinda una alternativa más, para la concepción de cubiertas ligeras de gran claro.

Puedo afirmar que este tipo de trabajos de investigación son un excelente medio para aprender más, en todos los aspectos de nuestra vida profesional, además de establecer relaciones de trabajo y cooperación con otros campos de investigación y enseñanza, como es el caso de los vínculos establecidos entre estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y de la Escuela Militar de Ingenieros, sin los cuales no hubiera podido concluir este trabajo.

También es importante mencionar la generación de la metodología que brinda una guía, que explica e ilustra el procedimiento geométrico para generar módulos Tensegrity con "n" número de postes. Esta investigación puede ser consultada para futuros trabajos que se propongan alcanzar nuevas metas, además de las ya logradas aquí, de manera que funcione como punto de referencia para las nuevas generaciones.

Otra conclusión importante, es hacer notar que en la propuesta desarrollada, se observa una factibilidad real tanto en concepción geométrica, como tecnológica; por lo que creo se debe dar un paso hacia adelante, construyendo el modelo a escala real para comprobar realmente su buen funcionamiento estructural.

Esta última es una propuesta que no está a mi alcance en este momento, pero espero que en un futuro no muy lejano, gracias a la divulgación que pueda dar a este trabajo encuentre los medios necesarios para la realización del prototipo, ya sea de forma académica en una maestría o particular buscando patrocinio con la iniciativa privada.

Quiero hacer énfasis que si bien la armadura desarrollada no cumple al pie de la letra con la definición dada anteriormente, esto no quiere decir que no sea un tensegrity, debido a que la definición se refiere a lo que sería un tensegrity puro, pero cuando éste se desarrolla constructivamente, los cables que delimitan cada módulo son discontinuos, aunque conservan su geometría base.

Esto debido a que actualmente sería complicado y por lo tanto costoso, construir los modelos con un sólo cable continuo como lo plantea la definición, a diferencia de los postes que si logran estar separados y nunca hacer contacto uno con otro. En la armadura existen cuatro cables que si son continuos, y están ubicados en los cuatro extremos, cuya finalidad es rigidizar y brindar estabilidad, además de generar una contraflecha.

5.2 APORTACIONES QUE HACE ESTA TESIS.

Como mencioné al inicio de este trabajo, es responsabilidad de nosotros los universitarios continuar con el trabajo de anteriores compañeros que han logrado colocar a la UNAM en un sitio privilegiado.

Este documento se desarrolló en base a los conocimientos de geometría adquiridos a lo largo de mi formación profesional, y a la búsqueda para ampliarlos, dando como resultado un documento, que recorre de forma concisa y directa los diversos puntos asociados con la concepción, de un prototipo de armadura que trata de ser lo más completo posible.

No podemos dejar de mirar el futuro del diseño arquitectónico y estructural, sin considerar cambios fundamentales, en la relación entre el desarrollo profesional de la ingeniería con la arquitectura. Este trabajo además trata de ligar estas dos áreas, para obtener un prototipo que además de ser agradable a la vista, sea un proyecto con respaldo geométrico, en el cual se vean reflejadas la unión de la ingeniería con la arquitectura, trabajando ambas, en una sola unidad estructural.

Esta investigación no es simplemente una búsqueda de innovaciones formales, se intenta también dar factibilidad estructural y conceptual, en el uso del sistema estructural Tensegrity, para convertirlo en una herramienta más de diseño, dentro del proyecto arquitectónico. La propuesta desarrollada no es una solución ideal definitiva, es sólo una de tantas aplicaciones geométricas, de éste sistema estructural; las bases están dadas, el límite en el diseño geométrico, lo pone la imaginación.

A N E X O S

“Hay que poner la materia en la trayectoria de los esfuerzos y donde están los esfuerzos poner la forma”

Dr. Fernando López Carmona

6 ANEXOS.

6.1 INTRODUCCIÓN.

La finalidad de éste último capítulo es brindar dentro de este mismo documento la recomendación de los materiales que considero son los óptimos para éste tipo de estructuras. Todas estas características y recomendaciones fueron tomadas de manuales, la información recopilada es solo una sugerencia; la decisión de cual material usar es responsabilidad del diseñador y se tomará en base a cada proyecto y su ubicación.

6.2 TENSORES.

La rigidez y la resistencia a la corrosión son requerimientos importantes, especialmente en exteriores, pues en nuestro país no existe una cultura de mantenimiento. Para estos casos los tensores sólidos son una solución más efectiva.

En los proyectos donde la flexibilidad y la geometría dependen en gran medida de los tensores, probablemente la mejor opción sean cables de alambres. Pero en caso de que los tensores estén en exteriores, el constructor deberá hacer comprender al cliente la importancia de inspecciones y del mantenimiento.

BARRAS SÓLIDAS. También se pueden usar barras sólidas de acero para tensores, en una cubierta de gran claro, estas pueden ser sujetas a mayores cargas que los cables del mismo diámetro, debido a la ausencia del "estiramiento del cable". Pero una barra sólida puede costar más del doble que un cable de la misma capacidad; si hay

limitantes económicas, la mejor solución tal vez sea usar un cable de mayor diámetro.

CABLES DE ALAMBRES. En términos de eficiencia estructural y resistencia a la corrosión, un cable de alambre compacto dará el mejor funcionamiento para un diámetro dado. Otro cable recomendable, sería uno de alambres gruesos, y el menos recomendable sería uno de muchos alambres delgados.

Pero desde el punto de vista de flexibilidad, en proyectos donde se utilizan poleas o el cable se enrolla, las recomendaciones serían exactamente al revés. Las especificaciones más comunes sobre cables serían:

COMPONENTES BÁSICOS.¹

Todos los cables de acero tienen por elementos básicos los alambres, los torones y el alma. Los alambres se fabrican en diferentes grados de acero; en acabado negro y en algunas aplicaciones conviene el uso de alambres recubiertos y protegidos por medio de zincado o galvanizado.

Lo más común es el utilizar cables fabricados con acero de alto contenido de carbono, que se selecciona para brindar al usuario en las diferentes construcciones, una amplia gama como son el acero tracción (AT), acero de arado (AA), acero de arado mejorado (AAM) y acero de arado extra mejorado (AAExM), sin recubrimiento o bien con protección de zinc o galvanizados.

Los grados de acero antes mencionados son equivalentes a los grados establecidos por la Sociedad Internacional de Estándares ISO, y que en otros países los designan como 160, 180, 200 en los grados de acero requeridos para la fabricación de cables.

¹ Datos tomados del Manual de cables de acero, S. A. (comesa).

Los torones se fabrican torciendo un cierto número de alambres entre sí sobre un alambre central en una posición geométrica determinada y ya colocados alrededor de un alma constituyen un cable.

El alma del cable sirve como un soporte a los torones, que están colocados a su alrededor y se fabrica de diversos materiales, dependiendo del trabajo al cual se va a destinar el mismo; el alma independiente de acero fabricada con siete torones de siete alambres cada uno (AIA): alma de torón formada por un torón (AT) igual a los demás que componen el cable y las almas de fibra (AF), que pueden estar formadas por fibras vegetales o sintéticas.

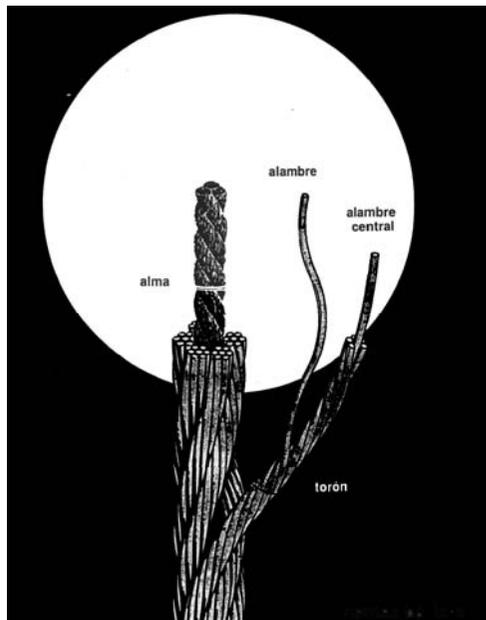


Figura 1 Componentes básicos de un cable.

El alma de acero se utiliza para aplicaciones donde el cable está sujeto a aplastamiento, o cuando el cable trabaja en lugares donde existen temperaturas elevadas que ocasionen que el alma de fibra se dañe con el calor y le proporciona una resistencia adicional a la ruptura, de aproximadamente un 8%.

Los cables con alma de acero son ligeramente más rígidos que los cables con alma de fibra. En aquellas aplicaciones en que no se está expuesto a las condiciones antes mencionadas, generalmente se utilizan las almas de fibra.

Los cables se lubrican durante su fabricación para disminuir la fricción generada entre alambres y torones al tensarlo, al pasarlo por poleas o al enrollarlo sobre tambores, así como para protegerlo de una posible corrosión durante el embarque y almacenamiento.

Estos lubricantes son el resultado de muchos años de investigación y desarrollo, y su uso también proporciona la lubricación necesaria para el inicio de la vida útil del cable.

Pero en los cables al igual que en las máquinas, si se desea obtener una vida óptima de ellos, se deberá continuar lubricando durante su uso.

TORCIDO DE LOS CABLES.

Los cables de acero se fabrican en torcido regular o en torcido lang. En el torcido regular los alambres del torón llevan una dirección opuesta a la que llevan los torones exteriores. Los alambres y los torones en un cable torcido lang, llevan la misma dirección.

Tanto en el torcido regular como en el lang, el sentido del torcido de los torones puede ser derecho o izquierdo. El primero de ellos en sentido de las manecillas del reloj, es usualmente el de fabricación normal y por lo tanto, son los que se utilizan en la mayoría de las aplicaciones.

Sin embargo, existen aplicaciones en que los cables con torcido izquierdo proporcionan ciertas ventajas, como es el caso del cable utilizado en las máquinas perforadoras por percusión, que contribuye a apretar las roscas de los aparejos.

Los cables con torcido regular, son más fáciles de manejar, con menor susceptibilidad a la formación de “cocas”², más resistentes al aplastamiento y distorsión y presentan menor tendencia a destorcerse al aplicárseles alguna carga, aunque no se tengan fijos ambos extremos del cable.

Los cables con torcido lang, son ligeramente más flexibles y muy resistentes a la abrasión y a la fatiga, pero tienen el inconveniente de tenderse a destorcer, por lo que únicamente deben utilizarse en aquellas aplicaciones en que ambos extremos del cable estén fijos y no se le permita girar sobre sí mismo.

PREFORMADO.

Los cables generalmente se suministran preformados, esto quiere decir que a los torones y a los alambres se les da previamente la forma que tendrán en el cable terminado,

² Las “cocas” se originan cuando por mal manejo, al cable se le forma un rizo y el cable se somete a tensión, ocasionando un doblez a los alambres del cable en la zona de la coca, los cuales son dañados y ya no darán el mismo rendimiento aunque aparentemente se volvieran a enderezar.

de manera que al cortar un cable o romperse los alambres y los torones, todos ellos permanecen en su lugar.

La operación de preformado en los cables, da a éstos mayor estabilidad al eliminar algunos esfuerzos internos entre los alambres, al mantenerlos en su posición original en el cable. En caso de ser necesario que los alambres mantengan su brío original y a formal solicitud, se pueden surtir cables sin preformado.

Hay que considerar que durante el uso y que cuando el cable esta sujeto a desgaste intenso, los alambres de un cable no preformado al romperse, tienden a sobresalir del cable, mientras que en un cable preformado los alambres permanecerán en su posición sin saltarse hacia el exterior.

FACTOR O COEFICIENTE DE SEGURIDAD.

Se considera como la relación entre la resistencia real de un cable y su carga de trabajo. Es muy importante usar un factor de seguridad adecuado, pues de ello depende el rendimiento de un cable. Normalmente se recomienda un factor de seguridad de 5 a 1, pero no menor.

Dependiendo de la aplicación, se puede variar este coeficiente cuando se manejan cargas que requieren un mayor cuidado o porque está involucrado un mayor riesgo, como es el caso de los cables utilizados en los ascensores de pasajeros, en donde el coeficiente puede aumentarse de 8 a 1 ó hasta 12 a 1.

Como ejemplo, cuando se requiere levantar una carga de 10 toneladas con una sola línea de cables y donde se cuenta con un factor de seguridad de 5 a 1, se seleccionará un cable con una resistencia a la ruptura de 50 toneladas, mínimo, manejando la carga en esta forma con amplio margen de seguridad.

BASES PARA LA SELECCIÓN DEL CABLE.

Son muy diversos los factores que influyen en la vida del cable de acero; para obtener un mejor servicio al seleccionarlo deben tomarse en cuenta principalmente los siguientes cuatro:

1.- Capacidad de carga adecuada. Es la suficiente resistencia a la ruptura que debe tener el cable seleccionado para soportar la carga de trabajo, con el factor de seguridad predeterminado.

2.- Resistencia a la fatiga. Se considera como la capacidad para soportar los efectos de flexión y también la vibración a los que está expuesto el cable durante su trabajo.

3.- Resistencia a la abrasión. Se considera como la propiedad de obtener el mínimo desgaste por fricción en relación directa a la severidad de los factores abrasivos a los que se puede estar sujeto.

4.- Resistencia a la corrosión. Se atenúan los factores corrosivos presentes en el medio en que trabaja el cable, dotando a éste, bien sea de la protección de galvanizado en los alambres o de lubricantes especiales, y aún de ambos.

Algunas de estas propiedades finales pueden ser tendencias opuestas; por ejemplo si se aumenta el diámetro de los alambres exteriores de un cable buscando una construcción con resistencia a la abrasión, se disminuye su resistencia a la fatiga por flexión en esos mismos alambres, por lo tanto, la selección de todos estos factores es más bien un balanceo armónico entre varias propiedades, en el cual se busca optimizar lo más posible todas, sin sacrificar en particular alguna de ellas en forma absoluta.

Otros factores que no se detallan, pero que a menudo intervienen en la selección son las temperaturas a las que puede estar expuesto el cable y el aplastamiento o

distorsión al que puede estar sujeto. Estos dos aspectos muy a menudo son la razón básica en la selección del tipo de alma del cable.

Hay que considerar también que en la selección de los cables es de primordial importancia conocer las características de diseño que tienen los equipos en sus tambores y poleas por donde será instalado en su momento el cable, por lo que debe tomarse en cuenta que hay una correlación de curvatura mínima que debe guardarse entre el diámetro del cable y el de poleas y/o tambores en donde se hará la instalación.

RECOMENDACIONES GENERALES.

1) El cable deberá guardarse bajo techo y evitar en lo posible el contacto con humedad, gases, etcétera.

2) Al colocar un cable nuevo a un aparejo, deberá permitirse que el cable trabaje algunas veces sin carga o con la carga mínima y permitir que se “acomode” a su trabajo. Una vez trabajando deberán evitarse en lo posible las cargas repentinas, ó la liberación también repentina de las mismas.

3) Siendo el cable de acero en realidad una máquina con muchas partes que trabajan entre si, deberá lubricarse con frecuencia.

4) Una causa común que acorta la vida de un cable es el estado de las poleas por donde pasa. Debe tenerse cuidado que la ranura de las poleas tenga el tamaño adecuado para que el cable asiente debidamente.

INSTALACIÓN DE PERROS O GRAPAS.

Los perros o grapas deberán utilizarse adecuadamente en un cable de acero. Si se utilizan correctamente, la terminación que de ellos resulte puede ser 90% efectiva.

Para obtener los mejores resultado, coloque los perros en la misma dirección, el puente deberá estar en la parte más larga del cable y el perro en forma de U en la parte más corta. En cualquier cable de acero deberá haber un mínimo de 3 perros y llegar a un máximo de 7 en los cables de mayor diámetro. Pero recuerde, las tuercas deberán apretarse firmemente y revisarse periódicamente.

COMO MEDIR EL DIAMETRO DE UN CABLE.

El diámetro de un cable de acero es el de la circunferencia que engloba a todos los torones, incluyendo los más distantes entre si. Se deben hacer cuando menos tres mediciones a un metro de separación cada una. El promedio de estas mediciones deberá considerarse como el diámetro del cable.

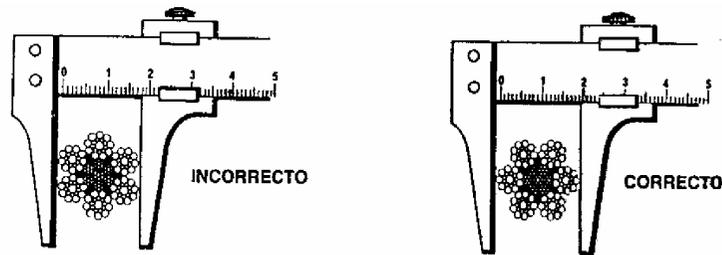


Figura 2 Medición del diámetro de un cable.

INSPECCIÓN PARA DETERMINAR EL DESGASTE Y DETERIORO.

El cable debe ser inspeccionado frecuentemente en toda su longitud, poniéndole atención particular a cualquier sección que haya mostrado algún deterioro. Debe ponerse especial atención a falta de lubricación, alambres rotos, desgaste excesivo o reducción en el diámetro del cable por elongación.

Cuando las circunstancias lo permiten algunas veces es muy útil el emplear en el equipo una longitud un poco mayor en el cable de la que realmente se requiere. Esta longitud extra permite el descarte de pequeños tramos de cable en los extremos, que tiene por fin alterar la posición de trabajo al recorrerlo en los puntos donde se tiene un deterioro máximo.

De encontrarse alambres rotos y si se piensa que debe proseguir la operación por un cierto tiempo, lo mejor es remover las puntas salidas de los alambres rotos. Esto se hace por medio de unas pinzas, doblando el alambre sobre si mismo hasta que rompa en su base, lo que provoca que el corte de esa punta se localice dentro del cable de acero.

Si un alambre roto se trata de eliminar con pinzas de corte, Invariablemente este método deja una punta pequeña que sobresale y que afectará los alambres adyacentes ocasionando daño en la operación.

Los cables son lubricados internamente durante su manufactura, es esencial que un lubricante adecuado se mantenga durante su vida de trabajo. Es muy importante por supuesto que un cable pueda y deba ser limpiado previamente antes del relubricado.

EXTREMOS DE TENSORES.

Además del uso de pernos o grapas, para las terminaciones o extremos de tensores se pueden usar tenedores, pernos y templadores, ya diseñados comercialmente. Al elegir el tipo de terminación para el tensor, se debe considerar lo siguiente:

- Si el tensor es de longitud fija, o necesita ser ajustable.
- Cual es el método más conveniente para ajustar.
- Diámetro y longitud del tensor, sea de cable o de barra de acero.

TENSORES DE LONGITUD FIJA.

Cuando se requiera ajustar la longitud de los tensores, estos deberán ser ajustables. Cuando este no es el caso, se puede utilizar una barra sólida moldeada o soldada a un tenedor o a un ojo. En estos casos la distancia de perno a perno deberá ser exacta, ya que no se podrá hacer ningún ajuste en sitio. Si un cable es usado para ser un tensor de longitud fija, en vez de una barra sólida, se deberá pretensar para evitar el estiramiento del mismo, y poder ajustarlo a una medida precisa.

TENSORES DE DIMENSIÓN AJUSTABLE.

Éstos son los más comunes en el mercado. El traccionar un tensor flojo, usualmente se lleva a cabo rotando un elemento específico. Si la conexión entre el tensor y el tenedor no es ajustable, entonces se necesitara de un templador para proveer el ajuste necesario. El ajuste del tensor puede ser hecho de dos formas:

- El primer método de ajuste, es el rotar un par de pernos roscados en los extremos del tensor. Este es el más apropiado para tensores rígidos y relativamente cortos.

- El segundo método de ajuste, es rotar un templador. Este es recomendable utilizarse para tensores flexibles y de gran longitud. En este caso, en ambos extremos el cable o la barra, terminan en tenedores los cuales están anclados.

Existen el mercado marcas como Crosby y Tripyramid (de importación) que se dedican a hacer piezas como ojos, tenedores y templadores, tanto para cables como para barras de acero; Los segundos cuentan con una mayor calidad en el acabado (también su precio se incrementa). Otra solución es el diseñar las piezas para mandarlas a hacer con barras de acero torneado.

6.3 POSTES.

El poste es un elemento clave en la ejecución del proyecto, pues es la pieza estructural clave por ser la que más cuenta visualmente. El correcto diseño de los postes y sus partes, elevan su calidad y eficacia como estructura.

La función estructural del poste es absorber los esfuerzos transmitidos por los tensores para lograr una unidad estructural; así como para los tensores se utilizó un material que absorbiera las tracciones, para los postes se recomienda usar tubos de acero, ya que algún perfil sólido, si bien es más resistente, tiene la desventaja de ser más pesado, y buscamos ligereza estructural.

Por estas razones, para los postes el material que utilizaremos son los tubos de acero, y a continuación enlisto sus principales especificaciones:

TUBOS DE ACERO.³

Estos comentarios proporcionan información sobre las bases y limitaciones de algunas disposiciones en las especificaciones, a fin de que los usuarios puedan emplearlas de modo más eficiente. Los comentarios y especificaciones no pretenden plantear ni resolver todos los problemas que puedan presentarse, ya que se supone que los usuarios de estos documentos son profesionales competentes que mantienen actualizados sus conocimientos.

Las especificaciones no pretenden establecer las cargas de diseño, ya que esta función corresponde a los reglamentos de construcción.

Dentro de estas especificaciones, se incluyen, además de los aceros estructurales, aceros fundidos, aceros forjados y de otros tipos, como remaches, tornillos, metal de aportación para soldar y pernos conectores de cortante.

Las disposiciones de las especificaciones tienen por objeto proporcionar un factor de seguridad, que impida alcanzar el esfuerzo de fluencia bajo la acción de las cargas de trabajo en los elementos principales de la estructura. La dirección paralela al eje de laminado de los perfiles es la que más interesa en el diseño de las estructuras de acero.

De ahí que el esfuerzo de fluencia determinado por medio de ensayos de tensión, es la propiedad mecánica más importante para la selección de los aceros bajo estas especificaciones. Debe reconocerse que otras propiedades mecánicas y físicas del acero laminado tales como anisotropía, ductilidad, resiliencia, resistencia a la corrosión, etc., pueden ser también importantes para el buen comportamiento de una estructura de acero.

No es posible incorporar en estos comentarios la información necesaria para dar una explicación completa relativa a todos los factores que deben considerarse en la selección y en las especificaciones de los materiales para aplicaciones especiales. Para estos casos, se recomienda al usuario de las especificaciones consultar la literatura especializada sobre las propiedades específicas que le interesan, para que pueda elegir al material más adecuado.

³ Manual de Construcción en Acero, Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, A. C.

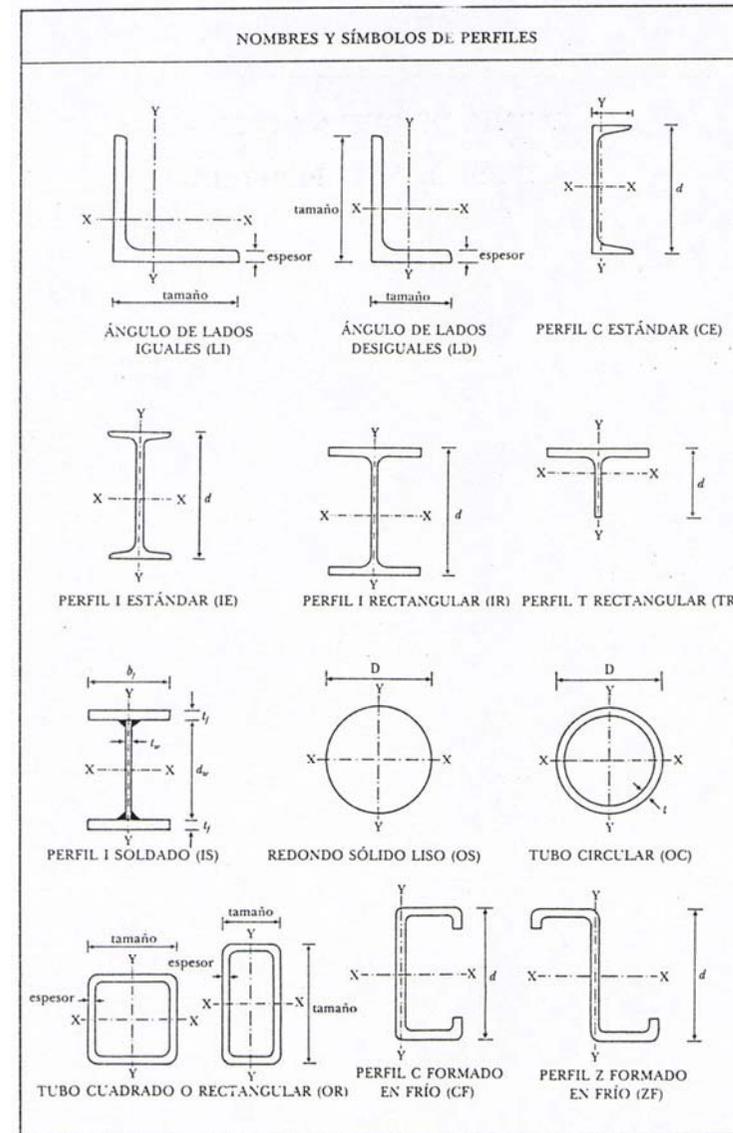
TENSION.

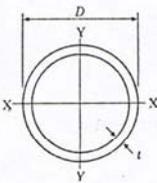
Se ha observado que una barra de acero dúctil con carga de tensión axial puede resistir, sin fractura, una fuerza mayor que el producto de su área total y su esfuerzo de fluencia correspondiente. Sin embargo, el alargamiento excesivo de un miembro en tensión, cuando ha alcanzado su límite de fluencia, no sólo marca el límite práctico de su utilidad sino que además puede causar la falla del sistema estructural al que pertenece.

Por otra parte, dependiendo de la magnitud de reducción del área total y de las propiedades mecánicas del acero, el miembro puede fallar por fractura en la sección del área neta, con una carga menor que la requerida para la fluencia del área total. De ahí que tanto la fluencia general en la sección del área total como la fractura en la sección del área neta, constituyan los estados límites de falla.

Las siguientes tablas están tomadas del Manual de Construcción en Acero, arriba referido y en el cual me base para tomar las especificaciones de los tubos que ocupe en la propuesta.

DESIGNACIÓN DE PERFILES		
NOMBRE	DESIGNACIÓN	UNIDADES
1. ÁNGULO DE LADOS IGUALES	LI tamaño y espesor	mm × mm
2. ÁNGULO DE LADOS DESIGUALES	LD tamaños y espesor	mm × mm × mm
3. PERFIL C ESTÁNDAR	CE $d \times$ Peso	mm × kg/m
4. PERFIL I ESTÁNDAR	IE $d \times$ Peso	mm × kg/m
5. PERFIL I RECTANGULAR	IR $d \times$ Peso	mm × kg/m
6. PERFIL T RECTANGULAR	TR $d \times$ Peso	mm × kg/m
7. PERFIL I SOLDADO	IS $\frac{b_f \times t_f}{d_w \times t_w}$	$\frac{\text{mm} \times \text{mm}}{\text{mm} \times \text{mm}}$
8. REDONDO SÓLIDO LISO	OS D	mm
9. TUBO CIRCULAR	OC $D \times t$	mm × mm
10. TUBO CUADRADO O RECTANGULAR	OR tamaños y espesor	mm × mm × mm
11. PERFIL C FORMADO EN FRÍO	CF $d \times$ cal.	mm × cal.
12. PERFIL Z FORMADO EN FRÍO	ZF $d \times$ cal.	mm × cal.

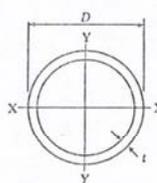




OC
TUBO CIRCULAR
DIMENSIONES Y PROPIEDADES

Designación D x t		Diámetro nominal	Diámetro interior	Peso	Área	Ejes X-X y Y-Y			Denominación
						I	S	r	
mm* x mm	in. x in.	in.	mm	kg/m	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm	
21 x 2.77 x 3.73	0.84 x 0.110 x 0.147	1/2	15.76	1.27	1.61	0.71	0.66	0.66	40 E
			13.84	1.62	2.06	0.83	0.78	0.64	80 NE
27 x 2.87 x 3.91	1.05 x 0.113 x 0.154	3/4	20.96	1.69	2.15	1.55	1.16	0.85	40 E
			18.88	2.20	2.80	1.87	1.40	0.82	80 NE
33 x 3.38 x 4.35	1.313 x 0.133 x 0.179	1	26.64	2.50	3.19	3.64	2.18	1.07	40 E
			24.30	3.24	4.12	4.40	2.63	1.03	80 NE
42 x 3.56 x 4.85	1.66 x 0.140 x 0.191	1 1/4	35.08	3.39	4.32	8.13	3.85	1.37	40 E
			32.50	4.47	5.69	10.09	4.78	1.33	80 NE
48 x 3.68 x 5.08	1.90 x 0.145 x 0.200	1 1/2	40.94	4.05	5.16	12.93	5.35	1.58	40 E
			38.14	5.41	6.90	16.33	6.76	1.54	80 E
60 x 3.91 x 5.54	2.375 x 0.154 x 0.218	2	52.48	5.44	6.93	27.66	9.18	2.00	40 E
			49.22	7.48	9.53	36.09	11.97	1.95	80 NE
x 8.74 x 11.07	x 0.344 x 0.436		42.82	11.11	14.16	48.40	16.05	1.85	160
			38.16	13.44	17.12	54.49	18.07	1.78	XXE
73 x 5.16 x 7.01	2.875 x 0.203 x 0.276	2 1/2	62.68	8.63	11.00	63.63	17.43	2.41	40 E
			58.98	11.41	14.53	80.00	21.92	2.35	80 NE
x 9.53 x 14.02	x 0.375 x 0.532		53.94	14.92	19.00	97.85	26.81	2.27	160
			44.96	20.39	25.98	119.34	32.70	2.14	XXE
89 x 5.49 x 7.62	3.5 x 0.216 x 0.300	3	77.92	11.29	14.39	125.65	28.27	2.96	40 E
			73.66	15.27	19.46	162.09	36.47	2.89	80 NE
x 11.15 x 15.24	x 0.438 x 0.600		66.64	21.35	27.19	209.80	47.20	2.78	160
			58.42	27.68	35.27	249.43	56.11	2.66	XXE
102 x 5.74 x 8.08	4 x 0.226 x 0.318	3 1/2	90.12	15.37	17.29	199.27	39.23	3.40	40 E
			85.44	18.64	23.74	261.47	51.47	3.32	80 XXE

NOTAS:
Se recomienda que al ordenar tubos de acero se especifique la norma oficial mexicana, el diámetro exterior y el espesor de pared.
Se fabrican tubos de otros diámetros y espesores que no aparecen en esta tabla, por lo que deberán consultarse los catálogos de los fabricantes.
Los espesores sombreados no son de fabricación común, por lo que se recomienda consultar con el proveedor su disponibilidad.
* Redondeado al milímetro.



OC
TUBO CIRCULAR
DIMENSIONES Y PROPIEDADES

Designación D x t		Diámetro nominal	Diámetro interior	Peso	Área	Ejes X-X y Y-Y			Denominación
						I	S	r	
mm* x mm	in. x in.	in.	mm	kg/m	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm	
114 x 6.02 x 8.56 x 11.13 x 13.49 x 17.12	4.5 x 0.237 x 0.337 x 0.438 x 0.531 x 0.674	4	102.26	16.08	20.48	301.05	52.68	3.83	40 E
			97.18	22.32	28.44	400.03	70.00	3.75	80 NE
			92.04	28.32	36.07	485.56	84.96	3.67	120
			87.32	33.54	42.72	552.45	96.67	3.60	160
			80.06	41.03	52.27	636.16	111.31	3.49	XXE
141 x 6.55 x 9.53 x 12.70 x 15.88 x 19.05	5.56 x 0.258 x 0.375 x 0.500 x 0.652 x 0.750	5	128.20	21.77	27.73	630.83	89.29	4.77	40 E
			122.24	30.97	39.45	860.73	121.83	4.67	80 NE
			115.90	40.28	51.31	1 071.03	151.60	4.57	120
			109.54	49.12	62.57	1 250.02	176.93	4.47	160
			103.20	57.43	73.16	1 399.98	198.16	4.37	XXE
168 x 7.11 x 10.97 x 14.27 x 18.26 x 21.95	6.63 x 0.280 x 0.432 x 0.562 x 0.719 x 0.864	6	154.08	28.26	36.00	1 171.63	139.23	5.70	40 E
			146.36	42.56	54.22	1 685.81	200.33	5.58	80 NE
			139.76	54.21	69.05	2 065.43	245.45	5.47	120
			131.78	67.57	86.07	2 457.92	292.09	5.34	160
			124.40	79.22	100.92	2 762.70	328.31	5.23	XXE
219 x 6.35 x 7.04 x 8.13 x 10.51 x 12.70 x 15.09 x 18.25 x 20.62 x 22.23	8.63 x 0.250 x 0.277 x 0.322 x 0.406 x 0.500 x 0.594 x 0.719 x 0.812 x 0.875	8	206.40	33.32	42.44	2 403.40	219.39	7.53	20
			205.02	36.82	46.90	2 639.28	240.92	7.50	30
			202.74	42.55	54.20	3 018.69	275.55	7.46	40 E
			198.48	53.09	67.63	3 694.07	337.20	7.39	60
			193.70	64.64	82.35	4 401.83	401.81	7.31	80 NE
			188.92	75.92	96.71	5 059.09	461.81	7.23	100
			182.60	90.40	115.16	5 854.75	534.44	7.13	120
			177.86	100.93	128.57	6 399.72	584.18	7.06	140
			174.64	107.93	137.49	6 745.91	615.78	7.00	XXE
			273 x 6.35 x 7.80 x 9.27 x 12.70 x 15.09 x 18.26 x 21.44	10.75 x 0.250 x 0.307 x 0.365 x 0.500 x 0.594 x 0.719 x 0.844	10	260.40	41.77	53.21	4 735.77
257.50	51.03	65.01				5 724.55	419.23	9.38	30
254.56	60.31	76.83				6 693.37	490.18	9.33	40 E
247.70	81.56	103.89				8 827.05	646.43	9.22	60 NE
242.92	96.02	122.31				10 212.70	747.91	9.14	80
236.58	114.76	146.19				11 928.50	873.56	9.03	100
230.22	133.06	169.51				13 516.60	989.86	8.93	120

NOTAS:
Se recomienda que al ordenar tubos de acero se especifique la norma oficial mexicana, el diámetro exterior y el espesor de pared.
Se fabrican tubos de otros diámetros y espesores que no aparecen en esta tabla, por lo que deberán consultarse los catálogos de los fabricantes.
Los espesores sombreados no son de fabricación común, por lo que se recomienda consultar con el proveedor su disponibilidad.
* Redondeado al milímetro.

6.4 GLOSARIO.

Cargas: Son las fuerzas externas que actúan sobre el cuerpo.

Cocas: Se le llama al rizo que se origina en un cable de acero, por mal manejo.

Compresión: Es la carga axial (carga aplicada en el eje del elemento), que produce un acortamiento en su longitud.

Coordenadas cilíndricas: Sistema de coordenadas para ubicar la posición de un punto en el espacio, para lo cual se requieren tres valores (radio, ángulo, alto).

Deformaciones: Es el cambio en las dimensiones de un cuerpo como resultado de un esfuerzo.

Elasticidad: A la propiedad que tienen los cuerpos de recuperar su forma original, al cesar la fuerza que lo deforma.

Esfuerzo: Mecanismo de fuerza dentro del material de una estructura; se representa como un efecto de presión (tracción o compresión) o un esfuerzo cortante sobre la superficie de una unidad de material y se cuantifica en unidades de fuerza por área unitaria.

Geometría Sinérgica: Puede definirse como una rama de las matemáticas, que se encarga de estudiar las propiedades de los cuerpos en el espacio, cuya acción conjunta o combinada es diferente, igual o mayor que la suma de los efectos que producirían estos por separado.

Plasticidad: Es una propiedad contraria a la elasticidad, ya que permite a los cuerpos conservar la deformación después de suprimido el esfuerzo.

Poste: Esencialmente, es un elemento que trabaja a compresión lineal y está sujeto a aplastamiento o pandeo, dependiendo de su esbeltez relativa.

Tensegrity: Sistema estructural establecido cuando un armazón discontinuo de elementos a compresión interactúa con un armazón continuo de elementos a tracción, para definir un volumen estable en el espacio.

Tracción: Es la carga axial (carga aplicada en el eje del elemento), que produce un alargamiento en su longitud.

7 REFERENCIAS.

7.1 BIBLIOGRAFÍA.

- Rene Motro.- Tensegrity: structural systems for the future.- Ed. Kogan page science.- Estados Unidos.- 2003.
- Matthys Levy, Mario Salvadori.- Why building fall down.- Ed. w.w. Norton & company.- New York.- 2002.
- Mario Salvadori.- Why building stand up.- Ed. w.w. Norton & company.- New York.- 2002.
- Tony Robbin.- Engineering a new architecture.- Ed. Yale university press.- Londres.
- Michele Melaragno.- An introduction to shell structures.- Ed. van nostrand reinhold.- New York.-
- Hugh Kenner.- Geodesic Math and How to Use it.- Ed. University of California Press Berkeley.- Los Angeles, California.- 2003.
- James Ambrose.- Estructuras .- Ed. Limusa, Grupo Noriega Editores .- Mexico D. F.- 1998.
- Fred B. Seely M. S.- Resistencia de materiales .- Ed. Unión Tipografica Editorial Hispano Americana .- México D. F.- 1954.

7.2 INTERNET.

www.georgehart.com

www.cjearnley.com/fuller-faq-2.html

www.kennethsnelson.net/icons/sculs.html

www.geigerengineers.com

www.thecrosbygroup.com/index.html

www.camesa.com.mx/index.htm

7.3 REVISTAS.

- Motro, R., "Tensegrity Systems and Geodesic Domes", International Journal of Space Structures, Vol. 3,4 y 5 (1990).
- Motro, R., "Structural Morphology of Tensegrity Systems", International Journal of Space Structures, Vol. 11 (1996).
- Furuya, H., "Concept of Deployable Tensegrity Structures in Space Application", International Journal of Space Structures, Vol. 7 (1992).